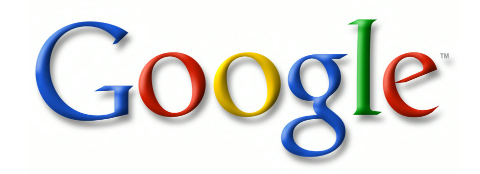
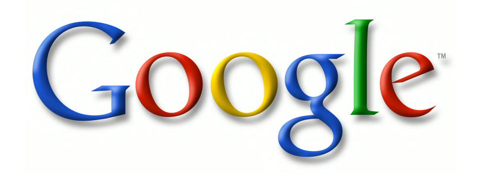
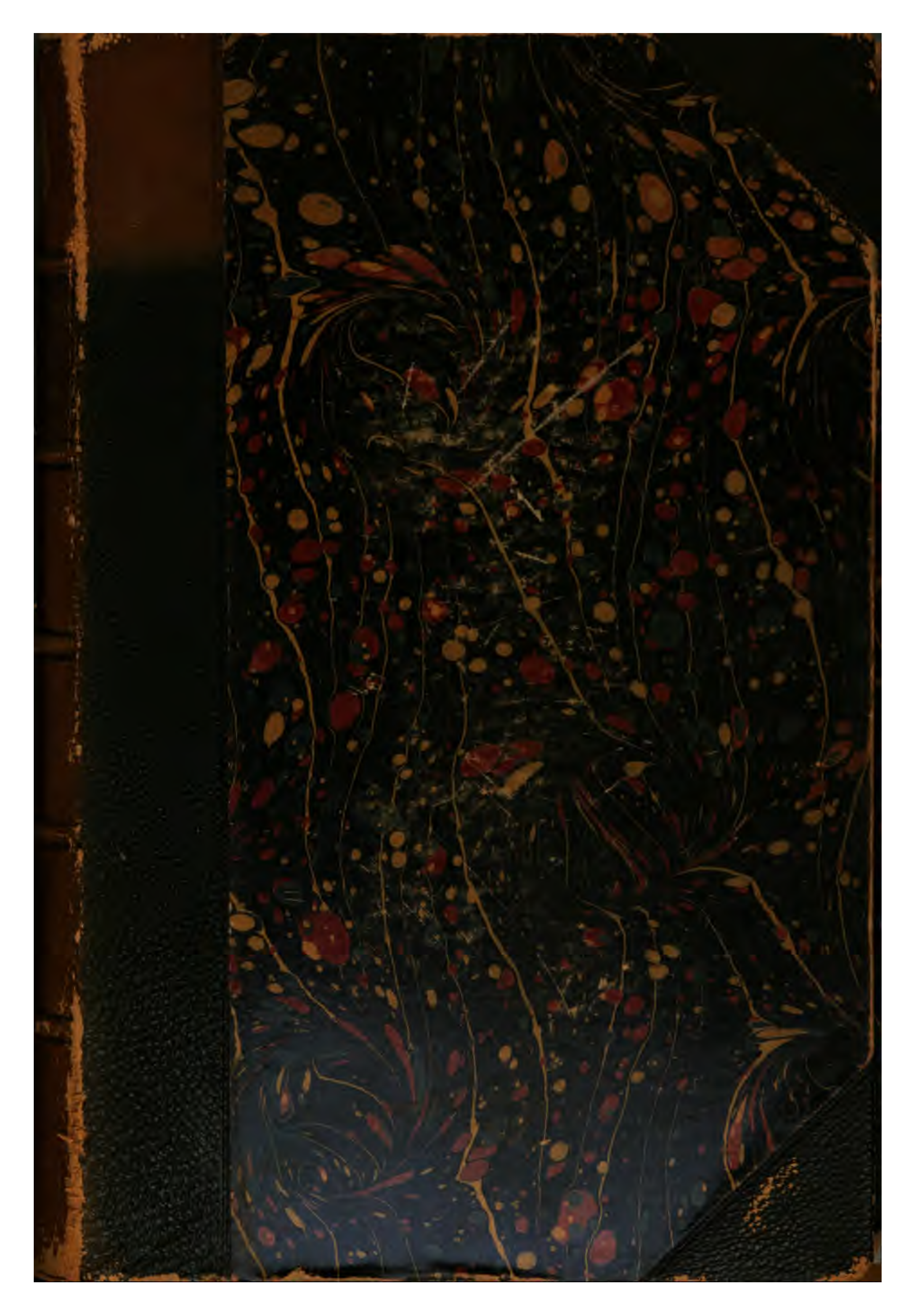







SIGILLVM ACADEMIAE HARVARDIANAE IN NOV ANG
CHRISTO ET ECCLESIAE
VE RI TAS

PHYSIKALISCHES

PRAKTIKUM

MIT BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG

DER

PHYSIKALISCH-CHEMISCHEN METHODEN.

Holzstiche
aus dem xylographischen Atelier
von Friedrich Vieweg und Sohn
in Braunschweig.

PHYSIKALISCHES

PRAKTIKUM

MIT BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG

DER

PHYSIKALISCH-CHEMISCHEN METHODEN

VON

EILHARD WIEDEMANN

UND

HERMANN EBERT.

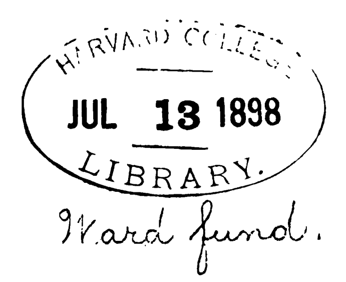
DRITTE VERBESSERTE UND VERMEHRTE AUFLAGE.

MIT 316 EINGEDRUCKTEN HOLZSTICHEN.

BRAUNSCHWEIG,

DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN.

1897.


HARVARD COLLEGE
JUL 13 1898
LIBRARY.

HERRN

GUSTAV WIEDEMANN,

PROFESSOR DER PHYSIK AN DER UNIVERSITÄT LEIPZIG

GEWIDMET

VON

DEN VERFASSERN.

VORREDE ZUR ERSTEN AUFLAGE.

Das von uns herausgegebene Buch soll hauptsächlich den Bedürfnissen der Anfänger überhaupt und der Studirenden der Chemie im Speciellen Rechnung tragen. Die Tendenz ist demnach eine elementarere, als sie in den vorzüglichen Werken von F. Kohlrausch, Glazebrook und Shaw, Witz etc., ihrer ganzen Anlage nach verfolgt wird. Diesen Zweck haben wir durch die Auswahl des Stoffes und die Art der Behandlung der einzelnen Aufgaben zu erreichen gesucht.

Wir haben einmal solche Aufgaben aufgenommen, welche den Anfänger in die Methoden und Gesetze der Physik einführen, sodann haben wir ein besonderes Gewicht auf die physikalisch-chemischen Methoden gelegt. Es schien dies um so nothwendiger, als in den Lehrbüchern der Physik gerade auf diese Gebiete nicht genügend eingegangen werden kann, trotzdem ihre Kenntniss für den Chemiker unumgänglich nöthig, für den Physiker höchst wünschenswerth ist.

Einem jeden Abschnitt ist eine Einleitung vorausgeschickt, in welcher die allgemeinen Gesetze, die darin zur Anwendung kommen, erörtert, und die Grössen, die gemessen werden sollen, definirt sind. Besondere Uebungen sind zum Theil Wiederholungen der Vorlesungsversuche. Sie sollen dazu dienen, obige Gesetze fester einzuprägen und diejenigen Gesichtspunkte hervorzuheben, welche bei der Construction der Messapparate und bei den angewandten Methoden in Frage kommen. Dadurch wird es dem Praktikanten ermöglicht, auch ohne Zuhülfenahme eines besonderen Lehrbuches sich auf die auszuführenden Messungen vorzubereiten. Selbst für Fortgeschrittenere ist es oft schwierig, aus einem grösseren Lehrbuche dasjenige herauszufinden, dessen sie für eine bestimmte Uebung bedürfen.

In der Einleitung werden auch die nöthigen Formeln, indess entsprechend der Tendenz des Buches ohne Zuhülfenahme höherer Mathematik abgeleitet.

Die Uebungen selbst sind je nach der Natur der in Frage kommenden Erscheinung qualitative oder quantitative. In letzterem Falle wird gezeigt, wie aus den einzelnen Beobachtungsdaten diejenigen Grössen sich ableiten, welche in der entsprechenden Formel enthalten sind. Diese Berechnung ist so geführt, dass der Praktikant nicht einfach die erhaltenen Werthe in die Formel einzusetzen braucht, sondern dass er den Gedankengang, welcher zu derselben geführt hat, noch einmal durchdenken muss. In den meisten Fällen ist die Berechnung an einem Zahlenbeispiele erläutert, das zugleich ein Maass für die erreichte Genauigkeit giebt. Die Zahlen sind solche, wie sie von Praktikanten bei den Uebungen erhalten worden sind.

Um den Praktikanten mit den allgemeineren Resultaten der physikalischen Chemie bekannt zu machen, sind die Beispiele für die Uebungen so ausgewählt, dass dieselben schon an den bei ihnen erhaltenen Werthen hervortreten. Auch sind möglichst die zugehörigen theoretischen Betrachtungen beigefügt.

Der Abschnitt „Gebraucht wird" soll es den Assistenten erleichtern, alle für eine Uebung erforderlichen Gegenstände zusammenzustellen.

Entsprechend den Zielen des Buches kann es nicht unsere Absicht sein, die Beschreibung von Präcisionsmessungen zu geben, sondern wir müssen uns mit einer geringeren Genauigkeit derselben begnügen. Daher werden die feineren Correctionen überhaupt nicht berücksichtigt und da, wo es sich darum handelt, den Einfluss einer Fehlerquelle hervortreten zu lassen, die Messungen so eingerichtet, dass der Fehler nicht zu klein ist.

Wir haben uns bemüht, die Apparate in sehr einfachen, dafür aber möglichst übersichtlichen Formen zu verwenden; sie sind dann auch zu Demonstrationsapparaten geeignet und ihre Beschaffung ist weniger gut dotirten Instituten möglich[1]).

Die sämmtlichen mitgetheilten Aufgaben können innerhalb zweier bis dreier Semester bei zwei- bis dreistündiger wöchentlicher Arbeit erledigt werden. Bei beschränkter Zeit lässt sich leicht eine Auswahl treffen, die es dem Praktikanten ermöglicht, sich in einem Semester eine Uebersicht zu verschaffen.

---

[1]) Die meisten der benutzten Apparate sind von dem Mechaniker des hiesigen physikalischen Institutes, Herrn Böhner, ausgeführt worden.

Die in dem Buche niedergelegte Lehrmethode hat sich während einer Reihe von Semestern in unserem Laboratorium bewährt; speciell im letzten Winter hat sich ergeben, dass mit Hülfe des Buches 20 bis 30 Praktikanten, von denen je zwei zusammen arbeiteten, an einem Uebungstage von uns beiden angeleitet werden konnten. Dabei war es noch möglich, eine grosse Anzahl der erhaltenen Resultate während des Praktikums selbst mit den Studirenden auszurechnen. So zeigte sich am besten, ob der Praktikant die Aufgabe verstanden hatte, event. konnten die nöthigen Erläuterungen gegeben werden.

Zum Schluss sei es uns noch gestattet, unseren allerbesten Dank zu sagen Herrn Geheimen Hofrath Quincke in Heidelberg für die Erlaubniss, die von ihm zusammengestellten vierstelligen Logarithmentafeln in unser Buch aufnehmen zu dürfen, Herrn Dr. Knoblauch in Erlangen für die Liebenswürdigkeit, dass er eine Revision gelesen und die Rechnungen controlirt hat, Herrn Professor Dr. Seubert in Tübingen für die Mittheilung der Tabelle und Tafel, Seite 71 und 72, sowie der Verlagsbuchhandlung von Friedr. Vieweg & Sohn, die keine Mühe gescheut hat, das Buch mit Holzschnitten auszustatten, die nach den von uns verwandten und erprobten Apparaten ausgeführt worden sind.

Erlangen im September 1890.

E. Wiedemann.
H. Ebert.

VORREDE ZUR DRITTEN AUFLAGE.

Die Ziele unseres Buches „Physikalisches Praktikum“ haben wir in der vorstehenden Vorrede zur ersten Auflage angegeben. Dass dasselbe einem wirklichen Bedürfniss entsprach, dürfte die Thatsache beweisen, dass nach etwa sechs Jahren eine dritte Auflage erforderlich wurde. Wir haben uns bei ihrer Bearbeitung bemüht, sie in noch höherem Maasse als früher den Zwecken

anzupassen, die in der Vorrede zur ersten Auflage ausgesprochen sind.

Dem entsprechend wurde eine Reihe von Abschnitten, wie über das Eiscalorimeter, über das Hankel'sche Elektrometer u. a. fortgelassen und dafür wurden andere Abschnitte eingefügt, so vor Allem in der Elektricitätslehre.

Zugleich sind wir bestrebt gewesen, für den Lehrer und Chemiker, der nach Beendigung seines Studiums für sich nach dem Buche arbeiten will, alles zur Anstellung der Versuche Erforderliche anzugeben. Wir haben daher auch manche scheinbar unwesentliche Kleinigkeiten angeführt und in einem besonderen kurzen Abschnitte am Schlusse einige praktische Winke zusammengestellt.

Da das Buch in den Uebungen auch vielfach von Solchen benutzt wird, deren mathematische Kenntnisse Lücken aufweisen, so haben wir am Schlusse ausser den Anweisungen für Logarithmenrechnen und den Andeutungen über die trigonometrischen Functionen noch eine Reihe von mathematischen Formeln zusammengestellt.

Für die Erlaubniss, von ihnen zusammengestellte Tabellen zu benutzen, sind wir Herrn Geheimrath Landolt und Herrn Professor Ostwald, vor Allem aber Herrn Präsident F. Kohlrausch in hohem Grade verbunden. Bei der Ausarbeitung einer Reihe der neuen Abschnitte hat uns Herr Privatdocent Dr. Simon in Erlangen sowie Herr Privatdocent Dr. Wiedeburg in Leipzig auf das Liebenswürdigste unterstützt.

Für die sonstigen vielfachen Winke von Fachgenossen sagen wir auch an dieser Stelle unseren besten Dank. Soweit es irgend möglich war, haben wir ihren Wünschen Rechnung getragen.

Zum Schlusse möchten wir nicht verfehlen, der Verlagshandlung unseren Dank auszusprechen, welche die Mühe nicht gescheut hat, auch diese Auflage wieder mit einer Reihe neuer Figuren auszustatten.

Erlangen und Kiel im April 1897.

E. Wiedemann.
H. Ebert.

INHALT.

A. Allgemeine Physik.

B. Wärme.

C. Optik.

D. Elektricitätslehre.

Einleitung.

1. Aufstellung von Gesetzen.

Wie in allen Naturwissenschaften ist auch in der Physik die Auffindung von Gesetzen die Hauptaufgabe der Forschung.

Naturgesetze sagen zunächst aus, dass Veränderungen einer Art (Ursachen) solche einer anderen Art (Wirkungen) nach sich ziehen. — Ein Naturgesetz, das sich nicht nur auf die qualitativen Vorgänge des Geschehens, sondern auch auf die quantitativen Verhältnisse bezieht, wird durch einen mathematischen Ausdruck, eine Formel, wiedergegeben [1]). Durch die Formel werden im einfachsten Falle zwei Grössen x und y [2]) so mit einander verknüpft, dass, wenn die eine x sich ändert, die Aenderungen der anderen y durch diejenigen von x bestimmt sind. — Da y sich mit x in bestimmter Weise ändert, sagt man „y ist eine Function f von x“ und schreibt dies $y = f(x)$, und, da man die Aenderungen von y als abhängig von denen von x ansieht, nennt man x die unabhängige, y die abhängige Veränderliche oder Variable.

Beispiel 1. Das Gesetz: Das Gewicht G von Körpern von derselben Dichte ist proportional ihrem Volumen V, sagt aus, dass n Cubikcentimeter eines Körpers n mal so viel wiegen, als 1 ccm; wiegt 1 ccm a Gramm, so wird das Gesetz durch die Gleichung ausgedrückt:

$$G = a V.$$

Wir sehen hier V als die unabhängige, G als die abhängige Veränderliche an, deren Beziehung zu einander die obige Gleichung wieder-

---

1) Ein qualitatives Gesetz ist: gleichnamige Elektricitäten stossen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an; ein quantitatives, das von Coulomb aufgestellte Gesetz: Die Kraft F zwischen zwei Elektricitätsmengen e_1 und e_2 ist direct proportional dem Producte ihrer Grössen, umgekehrt proportional dem Quadrate ihres Abstandes, oder als Formel:

$$F = f \frac{e_1 e_2}{r^2} \text{ (} f \text{ ist eine Constante).}$$

2) Man kann auch mehr als zwei Grössen betrachten, wir beschränken uns auf den einfachsten Fall.

Einleitung.

1. Aufstellung von Gesetzen.

Wie in allen Naturwissenschaften ist auch in der Physik die Auffindung von Gesetzen die Hauptaufgabe der Forschung.

Naturgesetze sagen zunächst aus, dass Veränderungen einer Art (Ursachen) solche einer anderen Art (Wirkungen) nach sich ziehen. — Ein Naturgesetz, das sich nicht nur auf die qualitativen Vorgänge des Geschehens, sondern auch auf die quantitativen Verhältnisse bezieht, wird durch einen mathematischen Ausdruck, eine Formel, wiedergegeben [1]). Durch die Formel werden im einfachsten Falle zwei Grössen x und y [2]) so mit einander verknüpft, dass, wenn die eine x sich ändert, die Aenderungen der anderen y durch diejenigen von x bestimmt sind. — Da y sich mit x in bestimmter Weise ändert, sagt man „y ist eine Function f von x“ und schreibt dies $y = f(x)$, und, da man die Aenderungen von y als abhängig von denen von x ansieht, nennt man x die unabhängige, y die abhängige Veränderliche oder Variable.

Beispiel 1. Das Gesetz: Das Gewicht G von Körpern von derselben Dichte ist proportional ihrem Volumen V, sagt aus, dass n Cubikcentimeter eines Körpers n mal so viel wiegen, als 1 ccm; wiegt 1 ccm a Gramm, so wird das Gesetz durch die Gleichung ausgedrückt:

$$G = a V.$$

Wir sehen hier V als die unabhängige, G als die abhängige Veränderliche an, deren Beziehung zu einander die obige Gleichung wieder-

[1]) Ein qualitatives Gesetz ist: gleichnamige Elektricitäten stossen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an; ein quantitatives, das von Coulomb aufgestellte Gesetz: Die Kraft F zwischen zwei Elektricitätsmengen e_1 und e_2 ist direct proportional dem Producte ihrer Grössen, umgekehrt proportional dem Quadrate ihres Abstandes, oder als Formel:

$$F = f \frac{e_1 e_2}{r^2} \quad (f \text{ ist eine Constante}).$$

[2]) Man kann auch mehr als zwei Grössen betrachten, wir beschränken uns auf den einfachsten Fall.

giebt. — a ist eine Constante, wie sie bei jedem Gesetze auftritt; der Werth dieser Constanten ist abhängig u. a.:

1. Von der Natur der Körper, auf die das Gesetz angewandt wird (bei Wasser ist in der obigen Gleichung $a = 1$, für Quecksilber $= 13{,}6$ etc.).

2. Von den speciellen Bedingungen, unter denen es in Wirksamkeit tritt. So ändert sich die Constante g in dem Gesetze für den freien Fall $s = {}^1/_2\, g t^2$ (vgl. S. 31) mit dem Orte, wo wir den Körper fallen lassen u. s. f.

3. Von den Einheiten, mit denen wir die Länge, die Zeit und die Masse messen. — Würden wir in obigem Falle G nicht in Grammen, sondern in Centigrammen ausdrücken, so würde der Wert von a 100 mal grösser werden.

Beispiel 2: Nach dem Boyle-Mariotte'schen Gesetze ist das Volumen v eines Gases umgekehrt proportional dem Drucke, d. h. wenn c eine Constante ist:

$$v = c/p \text{ oder } v p = c,$$

d. h. eine Gasmenge, die bei dem Drucke von 1 Atmosphäre das Volumen von 3 Litern einnimmt, nimmt bei dem Drucke von 10 Atmosphären ein Volumen von 0,3 Litern ein, bei dem von 0,1 Atmosphären ein Volumen von 30 Litern ein.

2. Prüfung von Gesetzen.

1. Ein Gesetz wird am einfachsten dadurch geprüft, dass man experimentell für eine Reihe von Werthen der unabhängigen Veränderlichen die der abhängigen ermittelt und untersucht, ob stets beim Einsetzen dieser Werthe die Gleichung, welche das Gesetz ausdrückt, erfüllt ist.

A. Für die Beziehung zwischen dem Einfallswinkel i und dem Brechungswinkel r besteht, wenn n eine Constante, der Brechungsindex, ist, das Gesetz

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n.$$

B. Das Gesetz wird geprüft, indem man für eine Reihe von Einfallswinkeln $i_1, i_2, \ldots, i_m$ die zugehörigen Brechungswinkel $r_1, r_2, \ldots, r_m$ bestimmt, deren Sinus aufsucht und prüft, ob

$$\frac{\sin i_1}{\sin r_1} = \frac{\sin i_2}{\sin r_2} = \frac{\sin i_m}{\sin r_m} = n$$

ist.

2. Eine andere Art der Prüfung eines Gesetzes besteht darin, dass man aus demselben bestimmte Folgerungen ableitet und untersucht, ob diese mit den Thatsachen übereinstimmen.

A. Nach dem Gravitationsgesetze bewegen sich die Planeten um

die Sonne in Ellipsen, in deren einem Brennpunkte die Sonne steht; die Beobachtungen bestätigen dieses.

B. Aus dem oben angeführten Gesetze von Coulomb über die Wechselwirkung elektrischer Mengen und der leichten Beweglichkeit der Elektricität in Leitern folgt für diese, dass bei seiner Gültigkeit sich nur auf ihren Oberflächen freie Elektricität befinden kann. — In der That lässt sich im Inneren von ruhenden Leitern keine Elektricität nachweisen, womit das Gesetz von Coulomb bewiesen ist.

Die Aufgabe aller experimentellen Untersuchungen und aller Beobachtungen ist ausser der Sammlung von Thatsachen:

1. Die Gesetze für die Erscheinungen zu finden, resp. zu prüfen, wie weit die aus bestimmten Annahmen abgeleiteten Gesetze richtig sind, womit auch die Annahmen selbst bis zu einem gewissen, je nach den Umständen verschiedenen Grade wahrscheinlich gemacht werden.

2. Die in den Gesetzen auftretenden Constanten zu bestimmen, zu prüfen, ob die verschiedenen Gebieten angehörenden Constanten Beziehungen zu einander zeigen, und zu ermitteln, wie gewisse Constanten von der Natur der Substanz abhängen.

Dies letztere geschieht vor Allem in der physikalischen Chemie.

Aus den obigen Ausführungen geht hervor, dass neben der Beobachtung die Messung aller bei einer Erscheinung auftretenden Factoren eine der wichtigsten Aufgaben der Physik und physikalischen Chemie ist.

3. Allgemeines über Messungen.

1. Die Genauigkeit einer Messung hängt davon ab, wie genau jede einzelne Grösse bestimmt werden kann. Im Allgemeinen können ohne besondere Uebung und Vorrichtungen Zeiten bestimmt werden bis auf 0,5 Secunden, Längen bis auf 0,2 mm, Temperaturen bis auf 0,05° C., Gewichte bis auf 0,5 mg. Durch grössere Uebung und Anwendung von besonderen Hülfsmitteln, wie Nonien u. s. f. kann die Genauigkeit sehr beträchtlich gesteigert werden.

Bei einem Resultate, das aus Messungen verschiedener Art, etwa von Temperaturen und Längen etc., erhalten wird, ergiebt sich der gesammte, durch die Unsicherheit der Einzelmessungen bedingte Fehler sehr nahe dadurch, dass man die von der Unsicherheit jeder einzelnen Messung herrührenden Fehler addirt.

2. Schätzung von Grössen. Maassstäbe sind im Allgemeinen in Millimeter getheilt, Temperaturen können an der Theilung bis auf 1°, 0,1°, 0,01° abgelesen werden. Eine grössere Genauigkeit mit diesen Theilungen lässt sich dadurch erreichen, dass man die Bruchtheile der Abstände zweier Theilstriche schätzt, und zwar geschieht dies gewöhn-

lich auf $^1/_{10}$, zweckmässig auch dann, wenn man nur die Drittel oder Viertel mit Sicherheit zu beurtheilen vermag.

3. Bei den Messungen bestimmt man im Allgemeinen die zu messende Grösse nicht nur einmal, sondern man stellt mehrere Messungen hinter einander unter denselben Bedingungen an, um sich von zufälligen Fehlern frei zu machen. Die dabei erhaltenen Einzelwerthe $A_1, A_2, \ldots, A_n$ geben erstens durch ihre mehr oder weniger grosse Uebereinstimmung ein Urtheil über die mit der betreffenden Methode zu erreichende Genauigkeit, zweitens lässt sich aus ihnen ein Werth berechnen, der grösseres Zutrauen verdient, als irgend eine einzelne Messung. Bildet man die Summe aller erhaltenen Zahlenwerthe: $A_1 + A_2 + \cdots + A_n$ und dividirt sie durch die Anzahl n der Einzelmessungen, so erhält man einen Werth A, der sich so eng wie möglich an die Gesammtheit der Zahlenwerthe anschliesst und der Wahrheit um so näher kommt, je grösser n ist. Diesen Werth

$$A = \frac{A_1 + A_2 + \cdots + A_n}{n}$$

nennt man das arithmetische Mittel. Indess muss man sich vor der oft vorkommenden Täuschung hüten, als ob man durch Häufung der Messungen die Ungenauigkeiten einer unvollkommenen Methode compensiren könne, da durch die Mittelwerthbildung nur die zufälligen Fehler beseitigt werden [1]).

4. Als Maass der Genauigkeit der einzelnen Beobachtungen und des aus ihnen berechneten Mittelwerthes dienen der mittlere und der wahrscheinliche Fehler einer einzelnen Bestimmung f_m und f_w und die entsprechenden Grössen des Mittelwerthes F_m und F_w. — Um diese Grössen zu erhalten, zieht man zunächst von einem jeden der einzelnen (n) Beobachtungswerthe $A_1, A_2, \ldots, A_n$ das Mittel A ab und quadrirt die sich ergebenden Differenzen $\delta_1 = A_1 - A$, $\delta_2 = A_2 - A, \ldots, \delta_n = A_n - A$, dann ist

$$f_m = \pm \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \cdots \delta_n^2}{n-1}} \qquad f_w = \pm\, 0{,}6745 f_m$$

$$F_m = \pm \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \cdots \delta_n^2}{n\,(n-1)}} \qquad F_w = \pm\, 0{,}6745\, F_m.$$

5. Bei jeder Messung orientirt man sich über die Genauigkeit, bis

---

1) Will man z. B. ein Gesetz prüfen, und müsste sich bei Gültigkeit desselben aus den Versuchen ein Werth 5 ergeben, und lieferten die Einzelbestimmungen die Zahlen 3, 5, 2, 7, 6, 8, 4, so ist freilich das Mittel all dieser Werthe

$$\frac{3 + 5 + 2 + 7 + 6 + 8 + 4}{7} = 5;$$

da aber die Extreme zu weit vom Mittel abliegen, so kann daraus kein Schluss auf die Richtigkeit des Gesetzes gezogen werden.

zu welcher gewisse Annahmen, die man bei der Messung macht, zutreffen. Soll z. B. die Dicke einer Platte bestimmt werden, so begnügt man sich nicht damit, die Dicke an einer Stelle zu messen, sondern man nimmt die Messung an verschiedenen Stellen vor und untersucht so, ob die Platte überall gleich dick ist.

Gewisse Grössen, welche durch die Beschaffenheit des Apparates bestimmt sind (die sogenannten Apparatconstanten) bestimmt man während einer Versuchsreihe mehrere Male, jedenfalls immer am Anfang und am Ende einer Beobachtungsreihe, um sich von ihrer Unveränderlichkeit zu überzeugen.

4. Dimensionen der physikalischen Grössen.

Die in der Physik durch Messung erhaltenen Grössen [1]) stellen Vielfache gewisser Einheiten dar, die sich selbst wieder auf die Einheiten der Länge l, der Zeit t und der Masse m zurückführen lassen [2]). In dieser Weise abgeleitete Einheiten heissen absolute Einheiten.

Bei wissenschaftlichen Untersuchungen benutzt man das sogenannte absolute Maasssystem: die Längeneinheit ist 1 cm, die Masseneinheit 1 g, d. h. die Masse von 1 ccm Wasser bei 4° C., die Zeiteinheit 1 sec; man nennt daher dieses Maasssystem auch Centimeter-, Gramm-, Secunden- (cm-g-sec.- oder C.-G.-S.-) System [3]). Neben diesen Einheiten werden in der Praxis vielfach grössere Einheiten [4]) benutzt, so das Meter, Kilogramm u. s. f.

Den Massen verschiedener Körper proportional sind die von ihnen unter dem Einflusse der Schwere auf ihre Unterlage ausgeübten Drucke, d. h. ihre Gewichte [5]). Setzt man daher das Gewicht der Masse 1 gleich 1, so bestimmen die gleichen Zahlen Massen und Gewichte. Häufig bezeichnet man, wenn auch ungenau, mit dem Gramm eine Gewichtseinheit und nicht eine Masseneinheit.

Werden mehrere Grössen gemessen, so drückt man sie alle in dem-

---

[1]) Auf das eigenartige Verhalten der Temperatureinheit gehen wir nicht weiter ein.

[2]) In neuerer Zeit ist von W. Ostwald vorgeschlagen worden, die Einheit der Energie statt der Einheit der Masse zu Grunde zu legen.

[3]) Ein $1/_{1000}$ mm heisst 1 Mikron μ, es spielt in der Mikroskopie eine grosse Rolle, die Dimensionen der Bacterien sind von der Grössenordnung des μ; $1/_{1000}$ Mikron wird mit $\mu\mu$ bezeichnet. Ein Quadratcentimeter wird qcm resp. cm^2, ein Cubikcentimeter ccm resp. cm^3 geschrieben u. s. w.

[4]) Einheiten, die 10^6 mal grösser resp. 10^6 mal kleiner sind, als die Grundeinheit, bezeichnet man durch die Vorsatzsilben Mega und Mikro. Also ist 1 Megadyne $= 10^6$ (1 Million) Dynen, 1 Mikrofarad $=$ (1 Milliontel) 10^{-6} Farad.

[5]) Ist m die Masse, g die beschleunigende Kraft der Schwere, G das Gewicht eines Körpers, so ist allgemein $G = g\,m$.

selben Maasssystem aus, z. B. alle Längen in cm, alle Flächen in qcm, alle Massen in gr resp. die Längen, Flächen, Massen in dm, qdm, kgr [1]).

In der physikalischen Chemie werden vielfach die Constanten, welche die verschiedenen Eigenschaften bestimmen, nicht auf ein Gramm des untersuchten Körpers bezogen, sondern auf das Atom- oder Moleculargewicht desselben; man versteht darunter das in Grammen ausgedrückte Gewicht, welches dem Atom- oder Moleculargewichte entspricht, wenn das Atomgewicht des Wasserstoffs = 1 gesetzt ist.

Die verschiedenen physikalischen Grössen enthalten die Länge (l), die Zeit (t) und die Masse (m) auf verschiedene positive oder negative Potenzen erhoben; die Potenzen heissen die Dimensionen der betreffenden Grössen.

Einige Beispiele für die Dimensionen enthält das Folgende. In den Ausdrücken, welche die Dimensionen wiedergeben, werden die einzelnen Grössen in [ ] eingeschlossen.

1. Fläche. Den Inhalt einer Fläche erhalten wir, abgesehen von Zahlenfactoren, durch Multiplication zweier Längen. Jede der letzteren hat aber die Dimension l, ihr Product also die Dimension l^2. Die Dimension der Fläche $[f]$ ist also l^2, $[f] = [l^2]$, sie hat die Dimension $+ 2$ in Bezug auf die Länge.

2. Volumen. Den Inhalt eines Volumens w erhalten wir durch Multiplication dreier Längen; seine Dimension ist daher l^3

$$[w] = [l^3].$$

3. Dichte. Die Dichte d ist die Masse der Volumeneinheit; sie wird erhalten durch die Division einer Masse durch ein Volumen. Die Dimension ist also m/l^3 oder ml^{-3}. Die Dichte hat in Bezug auf die Masse die Dimension $+ 1$, in Bezug auf die Länge die Dimension $- 3$

$$[d] = [ml^{-3}].$$

4. Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit v ist der in der Zeiteinheit zurückgelegte Weg, sie wird erhalten durch die Division der zurückgelegten Wegstrecke durch die dazu nöthige Zeit. Ihre Dimension ist also $l/t = [l t^{-1}]$; sie hat demnach in Bezug auf die Länge die Dimension $+ 1$, in Bezug auf die Zeit $- 1$

$$[v] = [l t^{-1}].$$

5. Beschleunigung. Die Beschleunigung b ist die Aenderung einer Geschwindigkeit in der Zeiteinheit. Ihre Dimension ist daher

$$[b] = [v/t] = [l^1 t^{-1}/t] = [l^1 t^{-2}].$$

6. Kraft. Die Kraft k ist proportional dem Producte einer Masse und der derselben durch sie ertheilten Beschleunigung. Ihre Dimension ist

$$[k] = [mb] = [m l^1 t^{-2}].$$

---

[1]) Wir setzen Gramm = gr, um Verwechselungen mit g (vgl. Anm. 3) zu vermeiden, amtlich wird Gramm mit g bezeichnet.

7. Arbeit. Die Arbeit a ist gleich dem Producte aus einer Kraft mit einer Länge. Ihre Dimension ist also

$$[a] = [lk] = [ml^2t^{-2}].$$

Dieselbe Dimension hat die Energie

$$[e] = [lk] = [ml^2t^{-2}] = [mv^2],$$

sie hat also auch die Dimension einer Masse und des Quadrates einer Geschwindigkeit. Diese Zerlegung tritt bei der kinetischen Energie auf.

Aus der obigen Gleichung bestimmt sich die Dimension der Masse $[m]$ durch die der Energie, der Länge und Zeit

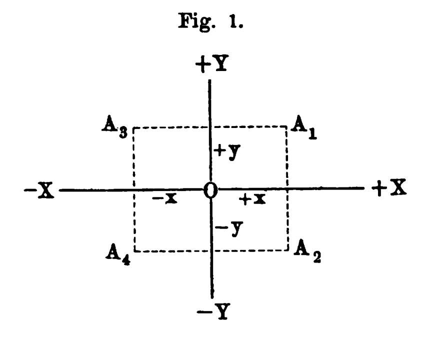
$$[m] = [el^{-2}t^2].$$

Formal kann man also ebenso gut die Masse wie die Energie neben Länge und Zeit den Dimensionen zu Grunde legen.

5. Graphische Darstellung.

Hat man für eine Reihe von Werthen einer unabhängigen Grösse, etwa für die einzelnen Stunden des Tages, die entsprechenden Werte einer abhängigen Grösse, etwa die zu diesen Zeiten herrschende Temperatur bestimmt, so stellt man häufig die Beziehung zwischen ihnen graphisch dar; ähnlich verfährt man mit dem durch eine Formel ausgedrückten Gesetze resp. der in einer Formel enthaltenen Beziehung zwischen zwei Grössen.

Fig. 1.

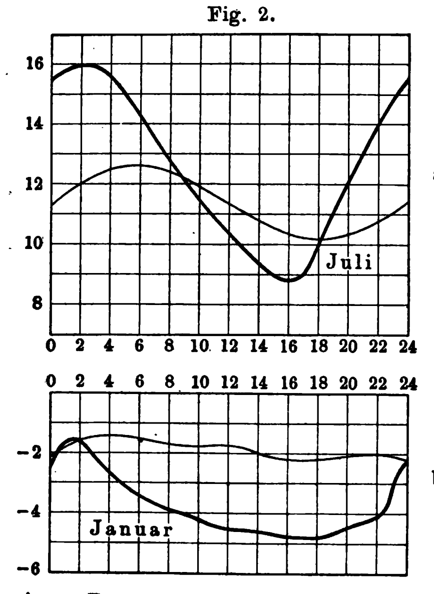


Man legt der Zeichnung ein rechtwinkliges Coordinatensystem (Fig. 1) zu Grunde, indem man zwei durch einen Punkt gehende, auf einander senkrechte Geraden — XOX und — YOY zeichnet. Die horizontale Gerade — XX heisst die Abscissenaxe, die zu ihr senkrechte — YY die Ordinatenaxe. — Die einzelnen Punkte der Abscissenaxe entsprechen der unabhängigen Variablen, ihr Werth ist jeweilig durch den in beliebigem Maasse gemessenen Abstand vom Punkte O gegeben. Die Punkte auf der Ordinatenaxe entsprechen in gleicher Weise der abhängigen Variablen. Den negativen Werthen der unabhängigen Veränderlichen entsprechen die Punkte der X-Axe links von O, den negativen Werthen der abhängigen die Punkte der Y-Axe unterhalb O. Die Abscisse und Ordinate eines Punktes in der Ebene oder kurzweg seine Coordinaten erhält man, wenn man von ihm auf die XX- und YY-Axe Lothe fällt und den Abstand der Fusspunkte vom O-Punkt ermittelt. Wir erhalten für die Coordinaten der Punkte A_1, A_2, A_3, A_4 die Werthe $A_1 : +x, +y$; $A_2 : +x, -y$; $A_3 : -x, +y$; $A_4 : -x, -y$.

Bei der graphischen Wiedergabe einer Erscheinung errichtet man in den einzelnen Punkten der x-Axe Lothe, deren Längen den für diese Werthe von x gefundenen Werthen von y entsprechen. Durch die Reihe von Punkten, die man in dieser Weise erhält, legt man eine Curve; diese lässt mit einem Blicke die Beziehung zwischen x und y und damit den allgemeinen Charakter des für die Erscheinung geltenden Gesetzes übersehen.

a) Die Figuren 2a und 2b stellen z. B. den Gang der Temperaturen während eines Tages im Januar und Juli dar; dabei bezieht sich die starke Curve auf die am Erdboden wirklich beobachteten, die dünne auf die mittleren Temperaturen der ganzen Luftschicht über den betreffenden Stellen der Erdoberfläche.

Fig. 2.



Als unabhängige Veränderliche dienen die von Mittag an gezählten und in Stunden gemessenen Zeiten, als abhängige die Temperaturen. Für den Januar sind die Werthe der letzteren negativ; sie liegen unter der Abscissenaxe. Für den Juli ist, da es sich nur um den Gang der Temperatur handelt, die der Temperatur von 7° entsprechende Horizontale in die Abscissenaxe gelegt [1]).

b) Das Gesetz für die gleichförmig beschleunigte Bewegung eines Punktes soll graphisch dargestellt werden. Die Anfangsgeschwindigkeit sei Null und die zurückgelegten Wege sollen von dem Ausgangspunkte der Bewegung an gerechnet werden.

Die Gesetze für eine gleichförmig beschleunigte Bewegung, z. B. für den freien Fall, heissen: Die Geschwindigkeit zur Zeit t ist direct proportional der Zeit, also wenn γ eine Constante bedeutet:

$$v = \gamma t.$$

Der während der Zeit t durchlaufene Weg s ist direct proportional dem Quadrate der Zeit, und zwar ist:

$$s = {}^1/_2\, \gamma t^2.$$

Wir wählen als unabhängige Veränderliche die Zeit, als abhängige die Geschwindigkeit und den Weg, letztere Grösse in Centimetern. —

[1]) Andere Beispiele siehe S. 72.

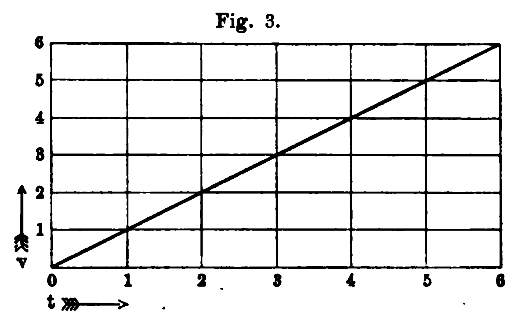
Die Einheit der Länge auf der Abscissenaxe entspreche 1 sec., die Einheit der Länge auf der Ordinatenaxe für die Curve der Geschwindigkeit v [1]) der Grösse γ cm/sec., für die Curve für die durchlaufenen Wege s der Grösse $\frac{\gamma}{2}$ cm (Fig. 3 und 4).

Zusammengehörige Werthe sind:

t	1	2	3	4	5	6	7	sec.
v	1	2	3	4	5	6	7	γ cm/sec.
s	1/2	4/2	9/2	16/2	25/2	36/2	49/2	γ cm.

Dadurch, dass wir die Werthe, mit denen γ resp. $\gamma/2$ multiplicirt ist, für v (Fig. 3) und s (Fig. 4) als Ordinaten in den $t = 1 \ldots 7$ sec. entsprechenden Punkten der Abscissenaxe zeichnen, erhalten wir für v und s eine Reihe von Punkten. Durch Verbinden aller Punkte ergeben sich Curven, welche die obigen Gesetze graphisch darstellen.

Fig. 3.



c) Wir stellen das Gesetz der Schwingungen eines Punktes graphisch dar, der sich wie die Kugel eines Pendels bewegt.

Die Verrückungen aus der Gleichgewichtslage zur Zeit t sind

$$u = a \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

Hierin bedeutet a die grösste Verrückung, maximale Amplitude oder Elongation; sie tritt für den grössten Werth des Sinus, nämlich 1, ein, dann ist $u = a$; T ist die Schwingungsdauer oder die Zeit zu einem Hin- und Hergange. — Die Zeit rechnen wir von dem Augenblicke an, wo der Punkt durch die Gleichgewichtslage geht, dann ist für

$$t = 0,\ a \sin 2\pi \frac{t}{T} = \sin 0 = 0,$$

also auch

$$u = 0.$$

Hat der Punkt $^1/_4$ Schwingung ausgeführt, so besitzt er seine Maximalverrückung a:

$$t = {}^1/_4\, T \quad u_{max} = a \sin 2\pi \frac{t}{T} = a \sin \frac{\pi}{2} = a.$$

[1]) Beim freien Fall an der Oberfläche der Erde bedeutet also die Längeneinheit auf der Ordinatenaxe 981 cm, an der Oberfläche der Sonne 27095 cm.

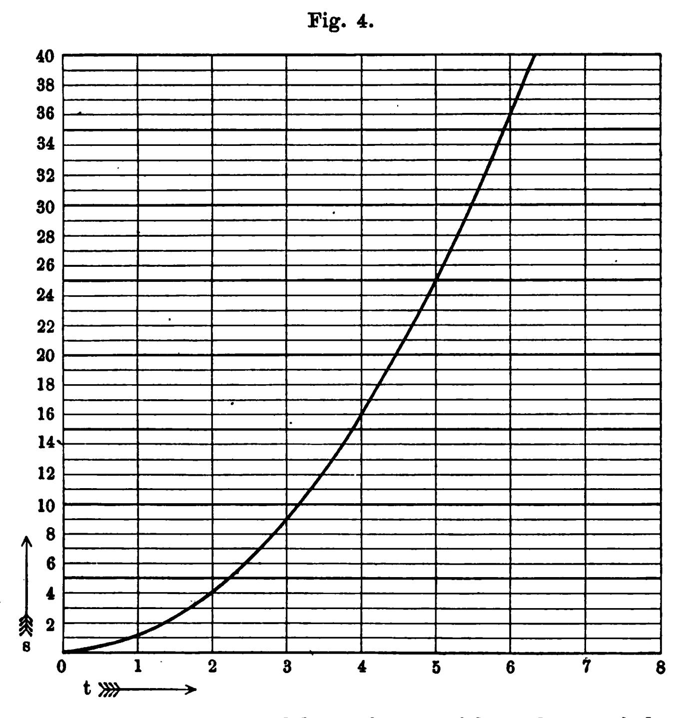
Der Punkt habe $^1/_4$ Schwingung ausgeführt, $t = {}^1/_4\, T$, dann ist nach dem Obigen $u = a$; der Punkt hat seine maximale Elongation.

$$\text{Für } t = {}^1/_2\, T \text{ ist } u = a \sin \pi = 0.$$

Der Punkt geht durch die Gleichgewichtslage, aber, wie eine einfache Betrachtung zeigt, im entgegengesetzten Sinne, als bei Beginn der Bewegung:

$$\text{Für } t = {}^3/_4\, T \text{ ist } u = a \sin {}^3/_2\, \pi = a,$$

Fig. 4.



der Punkt hat seine Maximalelongation erreicht, aber auf der entgegengesetzten Seite wie vorher.

$$\text{Für } t = T \text{ ist } u = a \sin 2\pi = 0.$$

Der Punkt geht wieder durch die Ruhelage, und zwar im selben Sinne, wie zu Beginn der Bewegung.

Bei weiterer Bewegung finden wir:

für t :	$^5/_4\, T$	$^6/_4\, T$	$^7/_4 T$	$2\, T$
„ u :	a	0	$-a$	0

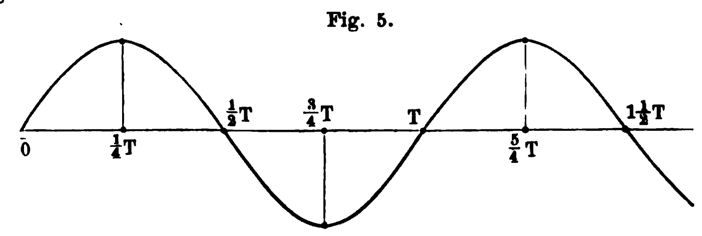
Der Verlauf der Bewegung zwischen $t = T$ und $t = 2\, T$ ist ganz gleich demjenigen zwischen $t = 0$ und $t = T$.

Zu beachten ist, wenn n eine ganze Zahl ist, dass zwischen $T = 0$ und $T = {}^1/_2\, T$ oder allgemein $t = 2\, n\, {}^1/_2\, T$ und $t = (2\, n + 1)\; {}^1/_2\, T$

stets positiv, dagegen zwischen $(2n + 1)\ ^1/_2\,T$ und $(2n + 2)\ ^1/_2\,T$ negativ ist.

Berechnen wir nun für eine grosse Zahl von Werthen von t die Werthe von u, tragen auf der Abscissenaxe die Zeiten, auf der Ordinatenaxe die Werthe von u auf, so erhalten wir die Curve Fig. 5, eine sogenannte Sinuscurve.

Fig. 5.



Der Vorgang ist ein periodischer, da sich alle Erscheinungen nach einer bestimmten Zeit, der Periode T, wiederholen.

Solche Bewegungen, auch Sinusbewegungen genannt, treten stets dann auf, wenn auf einen Punkt eine Kraft F wirkt, deren Grösse proportional der Verrückung x aus der Gleichgewichtslage ist und die die Körper in die Gleichgewichtslage zurückzuführen sucht, also wenn

$$F = -kx$$

ist.

Besonders wichtige Fälle sind die Schwingungen des Pendels, elastischer Körper, der Lufttheilchen beim Schall, des Lichtäthers, der Elektricität etc.

A. Allgemeine Physik.

I. Längen- und Winkelmessungen.

1. Der vorlaufende[1]) Nonius[2]).

Gebraucht wird: Modell des linearen, vorlaufenden Nonius mit Holzstäben zum Messen; Schubleere; 1 bis $1^1/_2$ dm langes Stück Messingrohr (ca. 4 cm Durchmesser), dessen Enden mit I und II bezeichnet sind. Modell eines Kreisnonius.

a) Der lineare Nonius.

Apparat. Eine Schiene aus Holz (Fig. 6) ist auf der Fläche A mit einer von Null an beginnenden Theilung versehen (Abstand zweier Theilstriche ca. 5 cm), wie es die Fig. 7 zeigt. In der Rinne B lässt sich ein Brettchen B' leicht verschieben, dessen Länge gleich dem Abstande von 10 bis 11 Theilstrichen auf A ist. Auf B' ist eine Theilung (Nonius) so gezeichnet, dass 10 Theile derselben gleich 9 Theilen der Haupttheilung auf A sind. Die Bezifferung dieser Theilstriche läuft in demselben Sinne wie auf A.

Fig. 6.

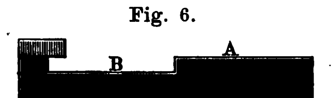
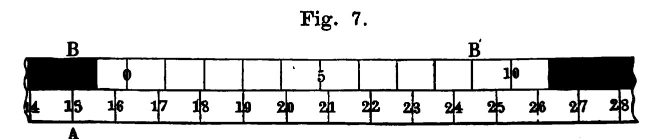


Fig. 7.



Uebung 1. 1) Man legt das Brettchen B' so, dass die Theilung auf B' gleichsinnig mit der Theilung auf A läuft.

2) Man bringt den Nullstrich des Nonius in die Verlängerung eines Theilstriches a (Fig. 8 ist $a = 40$) der Haupttheilung.

3) Man liest den Theilstrich der Haupttheilung ab, der mit dem letzten Strich des Nonius coincidirt. Die Striche 10 des Nonius und

---

1) Wir behandeln hier nur den vorlaufenden Nonius.

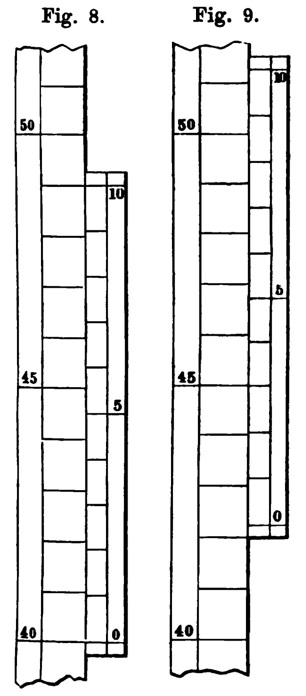
2) Die von Peter Werner 1631 construirte Vorrichtung wird fälschlich nach dem Portugiesen Nuñez „Nonius" genannt; die von Letzterem angegebene Winkeltheilung ist gänzlich von der hier beschriebenen verschieden.

$a + 9$ der Haupttheilung fallen zusammen. Die Länge eines jeden Theiles des Nonius ist also um 0,1 Scalentheil kleiner, als die Länge eines Scalentheiles der Haupttheilung.

4) Man schiebt den Nonius so weit vor, dass sein Strich 1, 2, 3... mit dem benachbarten Theilstrich $a + 1$, $a + 2$, $a + 3$ ... auf der Haupttheilung zusammenfällt, man hat dann den Nonius um $^1/_{10}$, $^2/_{10}$, $^3/_{10}$ ... Scalentheile verschoben, also beträgt die Entfernung des Nullpunktes des Nonius von dem vorangehenden Strich a der Haupttheilung 0,1, 0,2, 0,3 ... Scalentheile.

Man kann demnach durch die Beobachtungen von Coincidenzen die Entfernung des Nullstriches des Nonius, der immer als Index dient, von dem nächst vorhergehenden Theilstrich der Haupttheilung bestimmen, ohne auf blosse Schätzungen angewiesen zu sein.

Fig. 8. Fig. 9.



5) Man bringt den 10. Theilstrich zur Coincidenz; dann fällt auch der 0-Strich des Nonius mit einem Theilstrich zusammen, der Nonius ist um einen ganzen Theilstrich gegen die Haupttheilung verschoben.

Daraus ergiebt sich folgende Regel beim Ablesen des Nonius.

Um die Lage eines mit einem Nonius von der hier vorausgesetzten Beschaffenheit verbundenen Apparattheiles zu bestimmen, ermittelt man zunächst die Lage des Nullpunktes des Nonius an der Haupttheilung. Derselbe zählt die ganzen Scalentheile. Zur Messung der Zehntel sucht man denjenigen Theilstrich des Nonius, der in der Verlängerung eines Theilstriches der Scala liegt; die Ziffer desselben giebt die Zehntel. Der Nonius auf der Fig. 9 zeigt z. B. 42,3 Scalentheile.

Ist die Haupttheilung in Centimeter getheilt, so giebt der Nonius Millimeter, ist sie in Millimeter getheilt, so giebt der Nonius 0,1 mm.

Uebung 2. Messen von Stablängen mit dem Nonius:

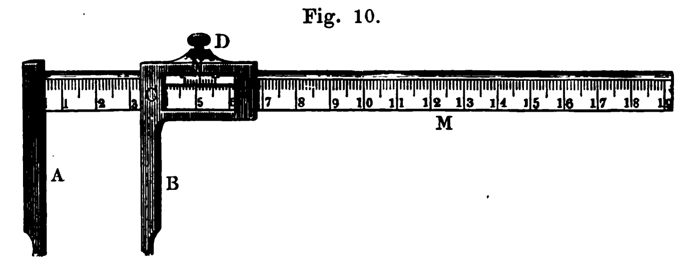
1) Man schiebt den Nonius B' so weit in der Rinne A vor, dass der vordere Rand des Brettchens B' gerade an dem Nullstrich der Haupttheilung steht und liest die Stellung des Nonius ab; sie sei s_0.

2) Man legt einen Holzstab in die Rinne A, so dass das eine Ende gerade bei Null der Haupttheilung liegt, schiebt das Brettchen B' gegen das andere Ende und liest die Stellung s_1 des Nonius ab.

Dann ist die Länge des Holzstabes $l = s_1 - s_0$.

Uebung 3. Ausmessung eines Cylinders mit der Schubleere (Fig. 10) und Berechnung seines Rauminhaltes. 1) Man bringt den Cylinder seiner Länge L nach, 2) mit beiden Enden je einmal mit dem grössten und kleinsten Durchmesser D_1 und D_2 zwischen

Fig. 10.

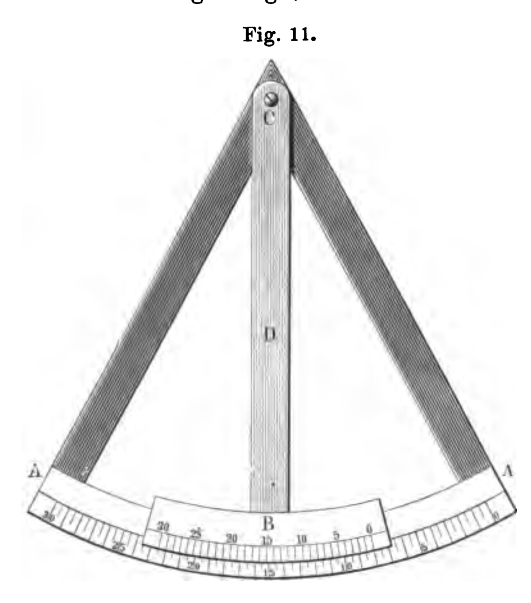


die Arme A und B der Schubleere; dieselben werden gleichmässig stark zusammengedrückt, der Schlitten C festgeschraubt und die Stellung des Nonius N in diesen Fällen und wenn A an B festgedrückt ist, abgelesen. Aus der Differenz der Ablesungen ergiebt sich D_1 und D_2 und damit der mittlere Durchmesser $D = \frac{1}{2}(D_1 + D_2)$ und der Halbmesser $R = \frac{1}{2} D$. Der Inhalt des Cylinders ist nahezu $I = \pi R^2 L$.

b) Der Kreisnonius (vergl. Fig. 11).

Apparat. Auf dem Kreisbogen A (Fig. 11) von ca. 80 cm Radius ist eine Theilung von ganzen und halben Graden angebracht. Auf ihm gleitet ein zweiter, kürzerer Kreisbogen B (Alhidade), der an einem um den gemeinschaftlichen Mittelpunkt C beider Kreisbogen drehbaren Arm D befestigt ist. Auf dem beweglichen Kreisbogen ist ein Bogenstück, welches auf dem Hauptkreise 29 Theile ($14\frac{1}{2}$ Grade) lang ist, in 30 gleiche Theile getheilt; sie sind von Null anfangend in demselben Sinne wachsend beziffert, wie die Theile des Hauptkreises A.

Fig. 11.



Uebung. 1) Man legt den Nonius so an die Hauptheilung, dass sein Nullstrich auf einen Theilstrich a der Haupttheilung fällt; dann fällt sein 30. Theilstrich wieder mit einem Theil-

strich der Hauptteilung zusammen, und zwar mit einem, der $14^1/_2$ ganze oder 29 halbe Grade von a abliegt. Jeder Theil des „Kreisnonius" ist daher um $^1/_{30}$ eines Theiles der Hauptscala oder um eine Bogenminute kleiner als ein solcher der Hauptscala. Strich 1 des Nonius ist also von dem zunächst liegenden der Hauptttheilung um eine Bogenminute entfernt, der zweite Strich um zwei Minuten (2') u. s. w.

2) Man schiebt den Kreisbogen mit dem Nonius so weit vor, dass der 1., 2. u. s. w. n te Theilstrich mit dem entsprechenden Theilstrich der Haupttheilung zusammenfällt, dann ist der Arm D um 1, 2 u. s. w. Bogenminuten gedreht worden. Der Nullpunkt des Nonius steht demnach von dem vorhergehenden Theilstrich der Haupttheilung um 1', 2',... ab. Daraus ergiebt sich folgende Regel beim Ablesen des Kreisnonius:

Man sucht die Lage des Nullstriches des Nonius an der Hauptttheilung auf; der Nullstrich zeigt die ganzen und halben Grade an. Dazu kommen noch einzelne Minuten; ihre Zahl findet man, wenn man an dem Nonius entlang geht und denjenigen Theilstrich desselben aufsucht, welcher mit einem Theilstrich der Haupttheilung zusammenfällt.

So zeigt der Nonius der Fig. 11 acht ganze Grade und 0 Minuten an.

Bemerkungen: Bei feinen Theilungen liest man den Nonius mit einer Lupe ab, dabei muss der coincidirende Theilstrich gerade in der Mitte des Gesichtsfeldes liegen. Durch Papierschirme oder kleine Spiegel wird das Licht auf die Theilung geworfen.

In der Regel sind sowohl am Anfang des Nonius wie am Ende noch einige Theilstriche ausserhalb der eigentlichen Scala desselben gezogen; dadurch kann man die Coincidenz besser beobachten, wenn dieselbe am Anfang oder am Ende des Nonius eintritt.

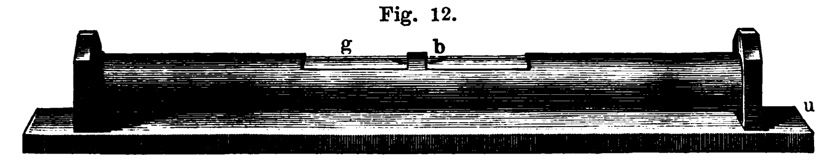
2. Libelle und Horizontalstellen einer Platte.

Gebraucht wird: Ebene Platte mit drei Fussschrauben. Röhrenlibelle.

Princip: Eine Ebene ist horizontal, wenn zwei in ihr liegende, nicht parallele, gerade Linien horizontal sind.

Apparat. Zum Horizontalstellen einer Platte, die durch drei Fussschrauben 1, 2, 3 getragen wird, dient die Röhrenlibelle oder

Fig. 12.

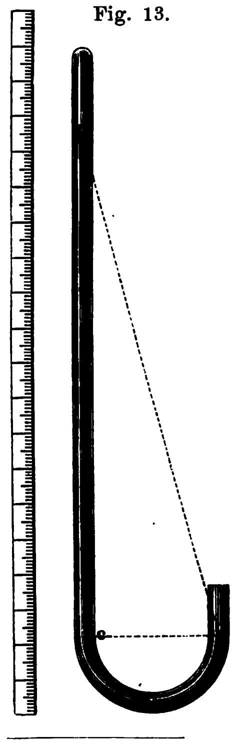


Wasserwage. Sie besteht aus einer auf einer Metallplatte befestigten Glasröhre g, deren innere Bohrung schwach convex nach oben gekrümmt ist (Fig. 12); dieselbe ist bis auf eine Luftblase b mit Aether gefüllt

und so auf der Metallplatte *u* befestigt, dass, wenn diese vollkommen horizontal steht, die Blase in der Mitte der Röhre einspielt.

Uebung. 1) Die Wasserwage wird so auf die ebene Platte gesetzt, dass sie parallel der Verbindungslinie zweier Fussschrauben 1 und 2 steht. Durch Drehen an beiden Schrauben in entgegengesetztem Sinne wird die Platte so lange geneigt, bis die Luftblase einspielt [1]).

2) Die Wasserwage wird auf der Platte um 90° gedreht, so dass ihre Richtung auf der Linie 1, 2 senkrecht steht; durch Schrauben an der dritten Fussschraube 3 wird ein Einspielen der Blase herbeigeführt.


Fig. 13.

3) Man bringt die Wasserwage wieder in die Richtung 1, 2 und controlirt das Einspielen, resp. erzielt dasselbe von Neuem durch Drehen an den Schrauben 1 und 2, und fährt so fort, bis die Wasserwage in der Lage 1, 2 und der dazu Senkrechten einspielt.

4) Jede Linie der Platte liegt jetzt horizontal, wovon man sich bei verschiedenen Stellungen der Wasserwage überzeugt.

5) Dass die Libelle selbst richtig justirt ist, ersieht man daraus, dass bei einer Drehung der Libelle um 180° in der Ebene der Platte die Blase unverändert einspielt [2]).

3. Das Kathetometer.

Gebraucht wird: Kathetometer mit Loth; einfaches Heberbarometer ohne Scala; Kugel, etwa ein Globus, von ca. 16 cm Durchmesser; weisse Tafel; ein in Millimeter getheilter Maassstab zum Aufhängen; Stativ hierzu.

Princip. Man hat oft den verticalen Abstand zweier Punkte zu bestimmen, ohne dass man einen Maassstab direct anlegen kann,

[1]) Statt dieser Röhrenlibelle verwendet man auch die weniger empfindliche Dosenlibelle, eine Metallkapsel, welche oben mit einem nach einer flachen Kugelschale geschliffenen Glase bedeckt und mit so viel Flüssigkeit gefüllt ist, dass eine kleine Luftblase übrig bleibt. Steht die untere Fläche der Kapsel horizontal, so spielt die Blase genau in der Mitte ein. Man stellt diese Libelle auf die zu horizontirende Platte und dreht so lange an den Schrauben, bis die Blase einspielt.

[2]) Bei feinen Röhrenlibellen kann die Glasröhre in der Hülse durch Schrauben gegen ihre Unterlage *u* geneigt werden. Man stellt die Platte durch Drehen an den Fussschrauben so, dass die Blase einspielt, dann dreht man die Libelle um 180°; zeigt sich eine Abweichung, so corrigirt man die eine Hälfte derselben durch eine Neigung der Platte, die andere durch eine Neigung der Glasröhre gegen ihre Unterlage. Oben wurde angenommen, dass die Libelle vom Mechaniker richtig hergestellt sei.

z. B. bei dem Heberbarometer (Fig. 13) die Höhendifferenz der beiden Kuppen *a* und *b*, d. h. den Abstand der Kuppe *a* von dem Punkte *c*, wo *c* die Projection von *b* auf die Verticale durch *a* ist. Dazu dient das Kathetometer.

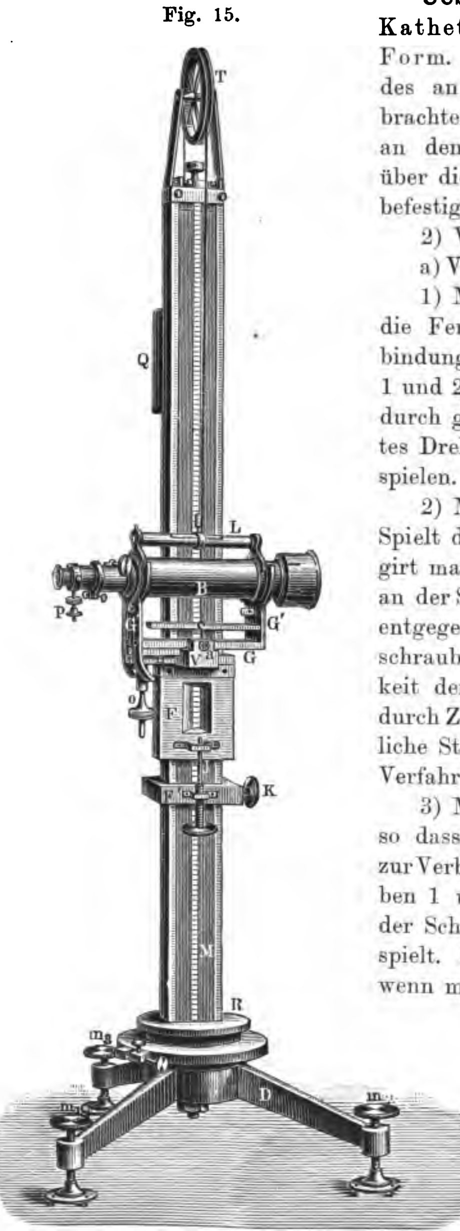
Fig. 14.

Apparat. a) Eine einfache Form des Kathetometers (Fig. 14) besteht aus einer Metallsäule *A*, längs deren der Schlitten *B* gleitet. Die Metallsäule wird mittelst zweier Fussschrauben $R R_1$ unter Benutzung des Lothes *E* vertical gestellt. Der Schlitten kann durch die Druckschraube *D* an dem Stab *C* in jeder beliebigen Höhe festgestellt werden. Durch die Schraube *S* wird der Stab *C* auf und ab bewegt. Auf *B* ist das Fernrohr *F* in einer Ebene drehbar, die senkrecht zur Säulenaxe liegt, also bei vertical stehendem Kathetometer der Horizontalebene entspricht. Neben der zu messenden Höhendifferenz *ac* (Fig. 13) wird ein in Millimeter getheilter Maassstab vertical aufgestellt oder aufgehängt.

b) Vollkommenere Form des Kathetometers (Fig. 15 a. f. S.). An der durch die Fussschrauben m_1, m_2, m_3 vertical zu stellenden, in dem Fusse *D* drehbaren Säule *M* gleiten die Schlitten *F* und *F'*, von denen der letztere durch die Schraube *K* in jeder Höhe festgeklemmt werden kann. Mit der Mikrometerschraube *J* kann man, wenn *F'* feststeht, *F* heben und senken; *F* trägt in den Gabeln *G* und *G'* das Fernrohr *B*, auf welches die Libelle *L* gesetzt wird, das Ganze lässt sich durch die Schraube *o* um die Axe *a* neigen. — Die Lage des Fernrohres wird mittelst des in dem Ausschnitte von *F* befindlichen Nonius an dem in die Vorderfläche der Säule *M* eingelegten und getheilten Silberstreifen *M* abgelesen. Dem Gewicht der Schlitten und

des Fernrohres hält das Gegengewicht Q, das an einer über die Rolle T laufenden Schnur hängt, das Gleichgewicht.

Fig. 15.



Uebung 1. Einstellen des Kathetometers. 1) Einfachere Form. Man stellt die untere Spitze des an dem Kathetometer angebrachten Lothes E durch Drehen an den Fussschrauben R und R_1 über die entsprechende an dem Fuss befestigte Spitze.

2) Vollkommenere Form.

a) Verticalstellen d. Drehungsaxe.

1) Man dreht die Säule so, dass die Fernrohraxe parallel der Verbindungslinie zweier Fussschrauben 1 und 2 liegt, und bringt die Libelle durch gleichzeitiges entgegengesetztes Drehen an denselben zum Einspielen.

2) Man dreht die Säule um 180°. Spielt die Libelle nicht ein, so corrigirt man die Hälfte der Abweichung an der Schraube o, die andere durch entgegengesetztes Drehen der Fussschrauben 1 und 2. Die Richtigkeit der Einstellung controlirt man durch Zurückgehen in die ursprüngliche Stellung, bezw. wiederholt das Verfahren noch einmal u. s. f.

3) Man dreht die Säule um 90°, so dass die Fernrohraxe senkrecht zur Verbindungslinie der Fussschrauben 1 und 2 steht, und dreht an der Schraube 3, bis die Libelle einspielt. Dieselbe spielt auch noch ein, wenn man die Säule um 180° dreht, sonst corrigirt man entsprechend.

4) Man dreht um 90° und prüft, ob die Einstellung noch richtig ist, sonst corrigirt man wieder u. s. f.

b) Horizontalstellen der Fernrohraxe.

5) Man bringt in einiger Entfernung von dem Kathetometer eine Marke an und stellt das Fernrohr auf diese ein. Nun hebt man die Libelle ab, nimmt das Fernrohr aus seinem Lager, legt es in entgegengesetzter Richtung wieder ein, so dass Objectiv und Ocular ihren Ort vertauschen, dreht die Säule um 180° und visirt wieder nach der Marke. Abweichungen sind zur Hälfte durch Neigen des Fernrohrs, zur Hälfte durch Verschieben desselben längs der Säule *M* zu corrigiren.

Uebung 2. Bestimmung des Durchmessers *D* einer grösseren Kugel. 1) Ein Globus wird vor einem weissen Papierschirm, daneben der verticale Maassstab und davor das Kathetometer aufgestellt.

2) Man stellt das Fernrohr so ein, dass der horizontale Faden des Fadenkreuzes erst den obersten und dann den untersten Punkt des Globus berührt, und bestimmt diese Lagen am Maassstabe; sie seien o und u, dann ist der Durchmesser $D = o - u$.

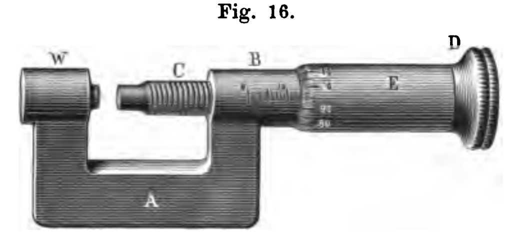
Beispiel: $o = 737{,}77$, $u = 580{,}85$, $D = o - u = 156{,}92$. Der Radius der Kugel $= {}^1/_2 D$ ist 78,46 mm (vergl. auch S. 13).

4. Das Mikrometer.

Gebraucht wird: Mikrometer (Fig. 16); circa 3 mm dicke Glasplatte; mehrere Drahtstücke.

Apparat. Das Mikrometer (Fig. 16) besteht aus dem Bügel *A*, der bei *B* die Mutter der Mikrometerschraube *C* trägt; *C* wird durch Drehen an dem gereifelten Griffkopfe *D* bewegt. In Folge einer besonderen Einrichtung wird die Schraube immer nur bis zu einer gewissen Stärke angedrückt; bei dem weiteren Drehen dreht sich der Kopf *D* allein weiter, ohne die Schraube fester zu schrauben. Die Ganghöhe der Schraube beträgt genau 1,00 mm. Mit ihr ist die Hülse *E* fest verbunden, deren Umfang an dem unteren Ende in 100 gleiche Theile getheilt ist. Auf *B* ist eine Längstheilung in Millimetern angebracht. Legt die Schraube sich gerade gegen das Widerlager, so steht der Rand der Kuppe *E* nahezu auf dem Nullstrich der Längstheilung, und der Nullpunkt der Theilung an ihrem Umfang auf einem längs *B* verlaufenden Längsstrich.

Fig. 16.



Bei einer beliebigen Stellung der Schraube giebt die Längsscala die ganzen Millimeter, die Theilung der Schraubenkappe die Hundertstel, wobei die Längslinie als Index verwendet wird.

Uebung. Ausmessen der Dicke eines Drahtes oder einer Glasplatte. 1) Man liest, wenn C an das Widerlager W angeschraubt ist, die Lage der Schraube ab, man erhält so den sogenannten Indexfehler J. 2) Der Draht resp. die Platte wird an mehreren Stellen, letztere z. B. mit den Ecken, zwischen die Mikrometerschraube und ihr Widerlager gebracht und die Dicke D' an der Scala und Trommel abgelesen. 3) Man zieht J, wenn es positiv ist, von D' ab, sonst zählt man ihn zu und erhält so die wahre Dicke D.

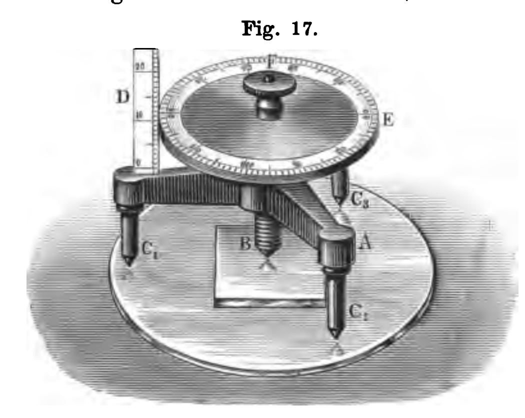
Beispiel: $J = 0{,}008$ mm; an verschiedenen Stellen ergiebt sich $D' = 3{,}040$, 3,045, 3,054, 3,053 mm. Die Platte ist nicht ganz planparallel; mittlere Dicke $D' = 3{,}048$. Corrigirte Dicke $D = D' - J = 3{,}040$ mm.

5. Das Sphärometer.

Gebraucht wird: Sphärometer; ebene Glasplatte von ca. 10 × 10 cm Oberfläche; die bei dem „Mikrometer" schon benutzte Glasplatte; eine zweite Glasplatte; Kugel von etwa 16 cm Durchmesser (S. 19); grössere biconvexe Glaslinse von etwa 18 cm Durchmesser.

Apparat. Das Sphärometer (Fig. 17) dient einerseits zur Bestimmung der Dicke von Platten, andererseits zur Bestimmung des Radius von kugelförmigen Oberflächen, von denen eventuell nur ein Stück gegeben ist, des sogen. Krümmungsradius. Es besteht aus einem Gestell A mit drei Füssen C_1, C_2, C_3, durch welches eine Mikrometerschraube B geführt ist. C_1, C_2, C_3 endigen in Stahlspitzen, die gleich weit von einander entfernt sind. Die ganzen Umdrehungen der Schraube werden an dem Maassstabe D abgelesen, die Bruchtheile an der in 100 gleiche Theile getheilten Scheibe E; mittelst des Knopfes F wird die Schraube mit der Scheibe bewegt.

Fig. 17.



Uebung 1. Aichung des Sphärometers. Ist die Schraube nicht so geschnitten, dass ihre Ganghöhe einen Millimeter beträgt, so muss man die einer ganzen Umdrehung entsprechende Verschiebung der Spitze, die Ganghöhe, besonders bestimmen.

1) Man setzt das Sphärometer auf eine Spiegelglasplatte und dreht die Schraube B so weit herunter, dass ihre Spitze eben die Platte berührt. Im Moment der Berührung tritt ein Mitgehen des Instrumentes im Sinne der Drehung und ein Wackeln desselben ein. Ablesung: J.

2) Man dreht die Schraube zurück und legt ein Stück einer planparallelen Glasplatte unter dieselbe auf die Spiegelglasplatte und schraubt wieder bis zur Berührung. Ablesung A. Die so gemessene Dicke D' der Platte ist $D' = A - J$ Scalentheile.

3) Mit dem Mikrometer (S. 19) bestimmt man die Dicke der Platte: D mm.

Dann ist der Reductionsfactor der Schraube (Ganghöhe der Schraube) gleich: $c = D/D' = D/(A - J)$ mm.

Mit c ist jede mit dem Sphärometer gemessene Dicke zu multipliciren, um sie in Millimetern ausgedrückt zu erhalten. Bei genauen Messungen muss man der Ausdehnung der Schraube in Folge von Temperaturänderungen Rechnung tragen.

Beispiel: $J = 0{,}003$, $A = 2{,}669$, $D' = A - J = 2{,}666$. Mit dem Mikrometer wurde $D = 2{,}941$ mm gefunden; demnach $c = D/D' = 1{,}103$.

Uebung 2. Messung der Dicke D einer zweiten Glasplatte. Die Ausführung gestaltet sich wie bei 1. Die in Scalentheilen ermittelte Dicke ist noch mit dem Reductionsfactor c zu multipliciren.

Beispiel: $J = 0{,}002$; $A = 2{,}722$, $D' = 2{,}720$, $D = D' . c = 2{,}720 \times 1{,}103 = 3{,}074$ mm.

Uebung 3. Messung des Radius R einer Kugeloberfläche. Die Entfernung der drei Spitzen C_1, C_2, C_3 von einander sei d; wird das Sphärometer auf eine Kugeloberfläche vom Radius R aufgesetzt, so muss die bewegliche Spitze um einen gewissen Betrag e heraufgeschraubt werden, wenn alle vier Spitzen wieder die Kugel gleichzeitig berühren sollen. Eine einfache Rechnung zeigt, dass

$$R = \frac{1}{2} e + \frac{1}{6} d^2/e.$$

1) Man bestimmt die Grösse J (vergl. Uebung 1).

2) Man setzt das Sphärometer auf die Kugeloberfläche, schraubt die Spitze B so weit zurück, bis alle vier Spitzen die Kugel berühren, und liest ab; Ablesung E.

3) Man setzt das Sphärometer mit zwei Spitzen C auf einen Maassstab und liest die Entfernung d ab.

4) Man multiplicirt $(E - J)$ mit dem Reductionsfactor c, erhält so e in Millimetern und hieraus und aus d den Krümmungsradius R nach der Formel.

Beispiel: An dem Globus (vergl. S. 19) ergab sich: $E = 13{,}497$, $J = 0{,}003$; also $e = 13{,}494 \times 1{,}103 = 14{,}884$ mm; d war gleich 80,0 mm. Also $R = 7{,}44 + 71{,}68 = 79{,}12$. Seite 19 wurde für dieselbe Kugel 78,46 mm mit dem Kathetometer gefunden.

Uebung 4. Messung der Krümmungsradien einer Linse.

1) Man bestimmt mit dem Sphärometer den Krümmungsradius beider Linsenflächen nach dem bei Uebung 3 angegebenen Verfahren.

Beispiel: $J = 0{,}004$, $E = 2{,}874$; $e = 1{,}103 \times 2{,}870 = 3{,}166$ mm; $d = 80{,}0$ mm. $R = 1{,}583 \times 336{,}9 = 338{,}5$ mm. Für die zweite Fläche wurde derselbe Krümmungsradius gefunden.

Bemerkung. Die Krümmung der Linsenflächen ist mit bestimmend für die optischen Eigenschaften einer Linse. Ist φ die Brennweite einer Linse, n der Brechungsindex des Glases, aus dem sie besteht, sind R_1 und R_2 die Krümmungsradien der beiden Flächen, so ist

$$\frac{1}{\varphi} = (n - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right).$$

Ist $R_1 = R_2 = R$ und wie bei dem gewöhnlich benutzten Glase $n = 1{,}5$, so ist $\varphi = R$.

Uebung 5. Man bestimmt nach der bei den Linsen angegebenen Methode die Brennweite φ und vergleicht sie mit dem gefundenen Krümmungsradius R.

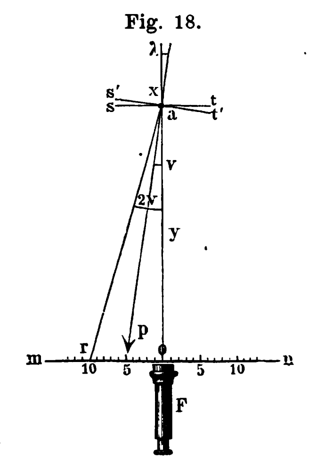
6. Die Spiegelablesung.

Gebraucht wird: Modell der Spiegelablesung, Messingklötzchen, Ablese-Fernrohr mit Scala (und eventuell Beleuchtungsvorrichtung), kleiner Spiegel auf Stativ.

Princip. Die Spiegelablesung dient zur Messung kleiner Drehungen und Verschiebungen, also sowohl zur Winkel- wie zur Längenmessung.

Nach dem Reflexionsgesetze wird ein auf einen Spiegel fallender Strahl so reflectirt, dass der reflectirte Strahl einen ebenso grossen Winkel mit der Spiegelnormale bildet, wie der einfallende Strahl (s. w. u.). Dreht sich daher ein Spiegel und mit ihm seine Normale um einen bestimmten Winkel v, so dreht sich bei unveränderter Richtung des einfallenden Strahles der reflectirte Strahl um den doppelten Winkel $2v$.

Fig. 18.



1) Im Abstande y (Fig. 18) vor einem Spiegel st stehe eine Scala mn, die in der Mitte bei dem Theilstrich 0 einen Spalt hat; vor dem Spalt steht eine Petroleumlampe; die einfallenden Strahlen werden in die ursprüngliche Richtung reflectirt, wenn die Spiegelnormale parallel zu den auffallenden Strahlen steht.

Dreht sich der Spiegel um einen Winkel v, so wird der in der Richtung oa auf den Spiegel fallende Strahl in einer Richtung ar reflectirt, so dass $\measuredangle\, oar = 2v$ ist; auf der Scala erscheint bei r eine Lichtlinie. Aus der Figur folgt:

$$tg\ 2v = or/y.$$

Je grösser y ist, um so mehr verschiebt sich die Lichtlinie bei gleichen Drehungen des Spiegels. Aus y und or bestimmt man $2v$

mittelst der Tabellen der trigonometrischen Functionen. Liest man bei zwei Winkeln v_1 und v_2 die Verschiebungen auf der Scala ab, or_1 und or_2, so ist:

$$tg\,2v_1 = or_1/y, \quad tg\,2v_2 = or_2/y,$$

also:

$$tg\,2\,v_2 : tg\,2\,v_1 = or_2 : or_1,$$

und da für kleine Winkel die Tangenten den Winkeln proportional sind:

$$v_2 : v_1 = or_2 : or_1.$$

Die Drehungswinkel verhalten sich wie die Verschiebungen auf der Scala.

2) Man denke sich die Lampe durch ein Fernrohr F ersetzt, dessen Axe senkrecht zur Scala mn steht und so eingestellt wird, dass man die Scala im Spiegel deutlich sieht. Steht der Spiegel senkrecht zu dem Fernrohr, so sieht man den gerade unter dem Objectiv befindlichen Strich 0 durch das Fadenkreuz gehen, bei einer Drehung des Spiegels sieht man die Spiegelbilder seitlich gelegener Theile, also etwa den Theilstrich 10. Das Ende der Normale des Spiegels hat sich dann nahezu um $^1/_2\,10 = 5$ Theilstriche verschoben. Sieht man etwa den Theilstrich z_2 und bei irgend einer Anfangslage den Theilstrich z_1 in der Mitte des Gesichtsfeldes, so ist die Drehung des Spiegels bestimmt durch

$$tg\,2v = \frac{z_2 - z_1}{y}.$$

Man kann hiernach aus der beobachteten Verschiebung $z_2 - z_1$ und dem Scalenabstande y die Spiegeldrehung v berechnen.

3) Die Spiegelablesung kann man ferner zur Messung kleiner Längenänderungen verwenden.

Ist mit der Axe des Spiegels ein senkrecht zu derselben stehender Stab ax von der Länge x verbunden, und verschiebt man dessen Ende um eine kleine Strecke λ, so verschiebt sich der Endpunkt der Normalen p des Spiegels auf der um y entfernten Scala sehr nahe um $\lambda\,.\,y/x$ [1]), dagegen das Ende r des reflectirten Strahles, d. h. das Bild des Spaltes, um eine Strecke $q = 2\,\lambda\,.\,y/x$, es ist also

$$\lambda = q\,.\,x/2\,y.$$

Lesen wir mit Fernrohr und Scala ab und sehen wir in der Anfangslage den Theilstrich z_1, nach der Verschiebung den Theilstrich z_2, so ist $q = z_2 - z_1$, also ist

$$\lambda = \frac{(z_2 - z_1)\,x}{2\,y}.$$

Es ist gleichgültig, ob die Spiegelnormale ap in der Verlängerung von ax liegt oder nicht.

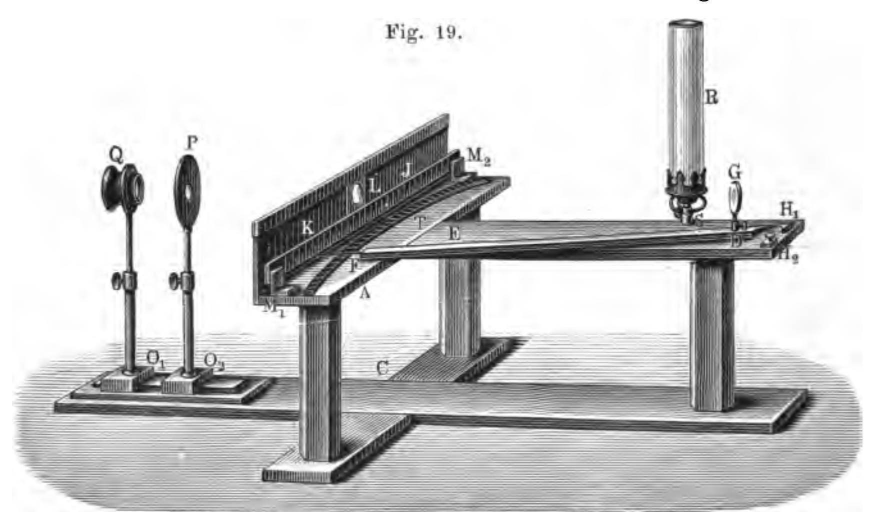
---

[1]) Dabei ist vorausgesetzt, dass die Drehungen so klein sind, dass man die Tangenten durch die Bögen ersetzen kann.

1. Uebungen am Modell.

Apparat (Fig. 19). Auf dem Tischchen *A*, welches auf dem Brette *C* steht, dreht sich der Hebel *E* um *D*. Bei H_1 trägt sein kürzerer Arm eine Schneide, der eine auf dem Tische *A* befestigte zweite, H_2, gegenübersteht. Bei *D* ist auf dem Hebel der Spiegel *G* befestigt. Der längere Hebelarm trägt den Zeiger *F*, der an der Kreistheilung *T* die Winkeldrehung von *E* anzeigt. An dem durch die Stützen M_1 und M_2 getragenen Brett *J* ist auf der dem Spiegel *G* zugekehrten Seite eine gerade Scala *K* angebracht; die Nullpunkte beider Scalen liegen in der Mitte von *J*. Hier ist das Brett durchbohrt und trägt in dieser

Fig. 19.



Durchbohrung die Sammellinse *L* (circa 20 cm Brennweite). *DH* ist 5, *DF* 50 cm lang; die Scala *T* ist in Grade getheilt; auf der Scala *K* ist die Länge eines Scalentheiles gleich der Länge des Bogens, der einem Grade auf *T* entspricht. — In der Richtung *DL* bewegen sich auf *C* die Schlitten O_1 und O_2, von denen der erste die Linse *Q* oder die Lampe *R*, der zweite das mit einem vertical ausgespannten Draht versehene Diaphragma *P* trägt. *QPL* entspricht einem astronomischen Fernrohr.

Steht die Lampe nicht auf O_1, so ist sie in den Träger *S* zu stellen.

Uebung 1. Verhältniss der Tangente zum Bogen. 1) Man stellt den Zeiger *F* auf den Nullstrich der Theilung *T* und visirt vertical von oben an der Theilung *K* hinab; auch auf dieser zeigt der Zeiger auf Null.

2) Man dreht den Hebel *E* um 1, 2, 3 u. s. f. Grade und liest in der angegebenen Weise die entsprechenden Stellungen des Zeigers *F* an der Scala *K* ab: Anfangs stimmen die Bogenlängen sehr nahe mit

der ihnen auf K zugehörenden Anzahl von Scalentheilen überein, dann wächst die letztere schneller. Die Scalentheile auf K sind die trigonometrischen Tangenten der zugehörigen Bögen auf T. Man erhält so z. B.:

$\alpha =$	1	2	3	4	5	10	15	20	Grade,
$tg =$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	10,1	15,4	20,9	Scalentheile.

Für kleine Winkel kann man also für die Tangente den Bogen setzen.

Bemerkung. Vielfach werden die Winkel nicht nach Graden, Minuten und Secunden gemessen, sondern nach der Länge der Bögen, die ihnen entsprechen. Einem Winkel von 360^0 entspricht der volle Kreisumfang, also bei einem Kreise vom Radius 1 die Länge 2π. Der Winkel, dem ein Bogen von der Länge des Radius 1 entspricht, ist also gleich $360/2\pi = 57,296^0$. Auf einem Kreise vom Radius 1 entspricht dem Winkel von α^0 ein Bogen von der Länge $\alpha/57,296$. Der Bogenlänge s des Kreises vom Radius Eins entsprechen $57,296 \times s$ Grade.

Uebung 2. Gang der Strahlen bei der Spiegelablesung. 1) Die Lampe R wird auf O_1 aufgestellt, man rückt den Zeiger F auf Null und schiebt so lange O_2 vor und zurück, bis ein scharfes Bild des Drahtes vor dem Diaphragma auf der Scala K entsteht. Die an dem Draht in P vorbeigehenden Strahlen fallen in der Richtung LD auf den Spiegel, werden hier reflectirt (wobei der Zeiger E die Richtung des Einfallslothes angiebt) und werden durch die Wirkung der Sammellinse L zu einem Bilde auf der Scala vereinigt.

2) Man dreht den Hebel E und damit den Spiegel um den Winkel α; die reflectirten Strahlen drehen sich um den doppelten Winkel 2α.

Für verschiedene Stellungen des Zeigers F auf T notirt man die Lagen z des Bildes auf der Scala K.

Beispiel:	$\alpha =$	0	2	5	10	Grade,
	$z =$	0,0	4,0	10,1	20,9	Scalentheile.

3) Nun nimmt man die Lampe von O_1, setzt sie in S ein, und bringt die Linse Q auf den Schlitten O_1. Man sieht durch Q die Scala K. Durch Drehen des Spiegels überzeugt man sich davon, dass man an dem Drahte in P immer denjenigen Theilstrich z erblickt, der nach dem Vorigen dem Winkel α entspricht.

Uebung 3. Ausmessung eines Messingklötzchens. Die Hebellängen H_1D und DF verhalten sich wie 1 : 10. Jede zwischen H_1 und H_2 befindliche Strecke erscheint also am Gradbogen in zehnfacher Länge.

1) Man bringt zwischen die Schneiden H_1 und H_2 eine Glasplatte, deren Dicke d mm man mit dem Mikrometer bestimmt hat, und liest, durch Q blickend, die entsprechende Scalenstellung z ab. Dann entsprechen einem Millimeter zwischen H_1 und H_2 $z/d = k$ Scalentheile.

2) Zwischen die Schneiden legt man ein parallelepipedisches Messingklötzchen entsprechend seinen drei Dimensionen und liest, durch Q blickend, an der Scala K ab: z_1, z_2, z_3. Dann sind die Kantenlängen: $a = z_1/k$, $b = z_2/k$, $c = z_3/k$, das Volumen V ist gleich abc.

Beispiel: $d = 3{,}04$ mm; $z = 3{,}1$ cm; $k = 1{,}02$; $z_1 = 1{,}02$, $z_2 = 2{,}04$, $z_3 = 5{,}10$; $a = 1$, $b = 2$, $c = 5$ mm; $V = 10$ cbcm.

Ein Indexfehler (d. h. die Abweichung von dem Nullstrich bei der Anfangslage) wird, wie bei anderen Messinstrumenten, von allen Ablesungen abgezogen, bezw. zu allen zugezählt.

2. Gewöhnliche Form der Spiegelablesung und Einstellen des Fernrohres.

Apparat. Zur Ablesung benutzt man ein Fernrohr, „Ablesefernrohr", mit dem man auf verhältnissmässig geringe Entfernungen accommodiren kann und welches um eine horizontale und eine verticale Axe drehbar ist. Ueber oder unter dem Fernrohr ist senkrecht zu seiner Axe die Scala befestigt.

Uebung. Einstellung des Fernrohres. 1) Ein kleiner Spiegel von etwa 2 cm Durchmesser wird auf einem Stativ aufgestellt.

2) Das Fernrohr wird auf einen Punkt eingestellt, der doppelt so weit wie der Spiegel von dem Orte entfernt ist, in dem man das Fernrohr aufstellen will. (Die von dem Spiegel reflectirten, von der Scala ausgehenden Strahlen scheinen von einem Punkte zu kommen, der gerade so weit hinter dem Spiegel liegt, wie die Scala vor demselben.)

3) Man geht mit dem Auge nahe an den Spiegel heran und sucht das reflectirte Bild des Auges, entfernt sich von dem Spiegel, so dass man stets das Spiegelbild des Auges sieht, bis in die Entfernung, in der man das Fernrohr aufstellen will. Man erhält das Auge in dieser Lage und stellt das Fernrohr mit der Scala vor dasselbe; meist erblickt man dann schon einen Theil des Scalenbildes im Fernrohr; durch Höher- bezw. Tieferstellen des letzteren bringt man das Scalenbild in die Mitte des Gesichtsfeldes (eventuell kann man auch das Bild eines Lichtes zur Einstellung verwenden).

4) Durch kleine Veränderungen in der Einstellung des Fernrohres, seitliches Verschieben und Hoch- und Niederstellen desselben, erreicht man, dass die Scala im Fernrohre scharf erscheint und dass das Bild des senkrecht über der Objectivmitte liegenden Theilstriches derselben mit dem Fadenkreuz zusammenfällt.

7. Barometerstand und barometrische Höhenmessung.

Gebraucht wird: Heberbarometer Fig. 8; Gefäss-, eventuell ein Reisebarometer; Thermometer; Kathetometer, eventuell Maassstab; Aneroïd-Barometer; mehrere Thermometer; langer Faden mit Gewicht an einem Ende desselben.

Einleitung. Der Barometerstand ist die Höhe einer Quecksilbersäule von 0^0 C., welche dem Luftdruck das Gleichgewicht hält. Da der Druck einer bestimmten Quecksilbersäule von der Grösse der Schwerkraft an der betreffenden Stelle abhängt, so muss man streng genommen der Aenderung der Schwere von Ort zu Ort Rechnung tragen, was aber meist vernachlässigt werden kann.

Apparate. Die einfachste Form des Quecksilberbarometers giebt Fig. 13. Zur Ablesung dient hier das Kathetometer. Meist ist mit dem Instrumente selbst eine Scala fest verbunden, so dass man die Lage der Quecksilberkuppen direct an ihm abliest.

Uebung. Messung der Höhe H des Barometerstandes. a) Durch Ablesen an der Scala. 1) Die Art der Ablesung der Höhendifferenz bei den Kuppen ist je nach dem Instrumente eine verschiedene.

2) Man liest die Temperatur der Umgebung des Barometers ab.

b) Mit dem Kathetometer. 1) Das Heberbarometer Fig. 13 wird an der Wand aufgehängt.

2) Man stellt das Kathetometer vor dem Barometer in solcher Entfernung auf, dass man mit dem Fernrohr scharf auf die Kuppen einstellen kann. Hat das Kathetometer keine Scala (Fig. 14), so hängt man neben dem Barometer einen Maassstab lothrecht auf.

3) Man stellt die Säule des Kathetometers mit Hülfe der Fussschrauben genau vertical.

4) Man liest für jede Lage des Barometers den Stand der oberen (a) und unteren (b) Kuppe ab, indem man nach Einstellung des horizontalen Fadens auf die Kuppen bei der Form a des Kathetometers, Fig. 14, das Fernrohr auf den Maassstab dreht. Dann ist $H = a - b$.

Reduction des Druckes einer Quecksilbersäule von t^0 auf denjenigen einer solchen von 0^0.

Der mit dem Maassstabe ermittelte Barometerstand, sowie die Länge irgend einer Quecksilbersäule h ist in doppelter Hinsicht zu corrigiren:

1. In Bezug auf die Ausdehnung des Quecksilbers. Ist die Temperatur des Quecksilbers t^0, so ist seine Dichte d_t entsprechend der Ausdehnung von 0^0 bis t^0 kleiner als diejenige d_0 bei 0^0. Ist β der cubische Ausdehnungscoëfficient, so wird das Volumen 1 beim Erwärmen von 0^0 bis t^0 zu dem Volumen $1 + \beta t$, die Dichte $d_t = d_0/(1 + \beta t)$, die Säule h von t^0 würde einer Säule $h_0 = h/(1 + \beta t)$ von 0^0 das Gleichgewicht halten oder, da $\beta = 0{,}000181$ klein ist:

$$h_0 = h(1 - 0{,}000181\, t).$$

2. Die Höhe h ist an dem Maassstabe nicht bei der Temperatur 0^0 abgelesen, für die derselbe getheilt ist. Ist γ der lineare Ausdehnungscoëfficient des Maassstabes, so ist die Anzahl der Theilstriche bei 0^0, die auf die Strecke h gehen: $h' = h(1 + \gamma t)$. Mit $1 + \gamma t$ müssen wir also den obigen Werth von h noch multipliciren, es ist also:

$$h_0 = h(1 - 0{,}000181\,t)(1 + \gamma t).$$

h_0 ist der sogenannte reducirte Barometerstand.

Bei Messing ist $\gamma = 0{,}000019$, bei Glas 0,0000085. Die durch die Ausdehnung des Maassstabes bedingten Correctionen sind klein.

Barometrische Höhenmessung.

Princip. Der Luftdruck an einem Orte ist bestimmt durch die Höhe und die Dichte der über demselben liegenden Luftschichten. Die Dichte hängt von dem Druck und der Temperatur ab. Steigt man um eine Höhe h empor, so nimmt der Druck ab: der Barometerstand sinkt. Man kann aus der Differenz der Barometerstände, die zu gleicher Zeit oder nahezu gleicher Zeit an zwei nicht zu weit von einander gelegenen Orten gemessen sind, die Höhendifferenz der beiden Orte bestimmen. Ist b_0 der reducirte Barometerstand, t_0 die Temperatur am tiefer gelegenen Orte, sind b_1 und t_1 dieselben Grössen am höher gelegenen, ist $t = {}^1/_2\,(t_0 + t_1)$, so ist die Höhendifferenz h der beiden Orte in Metern:

$$h = 18\,420\,.(1 + 0{,}004\,t)\,(\log b_0 - \log b_1),$$

oder bei nicht zu grossen Höhendifferenzen (bis etwa 1000 m):

$$h = 16\,000\,.(1 + 0{,}004\,t)\,(b_0 - b_1)/(b_0 + b_1).$$

Uebung. 1) Man begiebt sich mit einem Quecksilber- oder Aneroïdbarometer und einem Thermometer vor ein Gebäude, am besten an die Nordseite, und liest nahe über dem Erdboden den Stand b'_0 des Barometers und die Temperatur t_0 ab. An das Barometer muss man ein klein wenig klopfen; das Thermometer bewegt man einige Zeit durch die Luft.

2) Man begiebt sich in einem höheren Stockwerke an ein Fenster, welches über dem ersten Beobachtungspunkte liegt, und verfährt hier wie unter 1) (die Temperatur ist vor dem Fenster zu messen) und bestimmt den Stand des Barometers b'_1 und die Temperatur t_1.

3) Nach den obigen Formeln berechnet man aus b'_0, b'_1 die reducirten Barometerstände b_0 und b_1 und aus ihnen und aus $t = {}^1/_2\,(t_0 + t_1)$ die Höhe h.

4) Man lässt einen durch ein Gewicht beschwerten Faden aus dem Fenster bis auf den Boden hinab und misst seine Länge l, indem man ihn meterweise wieder aufzieht. Es ergiebt sich nahezu $l = h$.

II. Freier Fall und Pendel.

1. Freier Fall.

Gebraucht wird: Atwood'sche Fallmaschine mit zwei Uebergewichten, Wage mit Gewichten, Secundenpendel.

Einleitung. Unter Bewegung des Körpers verstehen wir seine Ortsveränderung mit der Zeit.

Bei der Bewegung eines materiellen Punktes kommt in Betracht: seine Bahn, seine Geschwindigkeit und seine Beschleunigung. Die Bahn ist die Curve, auf welcher er sich im Laufe der Zeit bewegt. Der in der Zeit t (tempus) zurückgelegte Weg s (spatium) ist die Anzahl von Längeneinheiten, welche der Punkt in dieser Zeit auf seiner Bahn durchlaufen hat. Legt der Punkt in gleichen Zeiten gleiche Wege zurück, so heisst die Bewegung gleichförmig, sonst ungleichförmig. Die Geschwindigkeit v (velocitas) ist der in der Zeiteinheit zurückgelegte Weg; wird also bei gleichförmiger Bewegung in der Zeit t der Weg s zurückgelegt, so ist $v = s/t$, d. h. die Geschwindigkeit ist eine Länge, dividirt durch eine Zeit, die Dimension derselben (vergl. S. 6) ist also $[l\,t^{-1}]$. Bei einer ungleichförmigen Bewegung ändert sich von Moment zu Moment die Geschwindigkeit. Bewegt sich der Punkt zur Zeit t in der sehr kleinen Zeit τ um die sehr kleine Strecke σ, so ist zu der Zeit t die Geschwindigkeit $v' = \sigma/\tau$; der Körper würde in der Zeit 1 die Strecke σ/τ zurücklegen, wenn er sich mit der gleichen Geschwindigkeit während derselben fortbewegte, wie an der Stelle, wo er sich zur Zeit t befindet.

Man theilt die ungleichförmigen Bewegungen in beschleunigte und verzögerte ein. Bei den ersteren nimmt die Geschwindigkeit mit der Zeit zu, bei den letzteren ab. Gleichförmig beschleunigte und verzögerte Bewegungen sind solche, bei denen in gleichen Zeiten die Geschwindigkeit um gleichviel zu- oder abnimmt.

Die Beschleunigung b ist die Aenderung der Geschwindigkeit in der Zeiteinheit; eine Verzögerung wird als negative Beschleunigung aufgefasst. Aendert sich in der kleinen Zeit ϑ die Geschwindigkeit um φ, so ist die Beschleunigung $b = \varphi/\vartheta$. Die Dimension der Beschleunigung ist also $[l\,t^{-1}/t] = [l\,t^{-2}]$.

Princip der Trägheit oder des Beharrungsvermögens von Galilei. Ein Körper bleibt so lange in Ruhe oder bewegt sich mit

constanter Geschwindigkeit in gerader Richtung so lange fort, als auf ihn keine Kraft wirkt. Geht der Körper aus der Ruhe in Bewegung über, oder ändert er seine Geschwindigkeit nach Grösse oder Richtung, erhält er also eine Beschleunigung, so wirkt auf ihn eine Kraft.

Die Grösse der wirkenden Kraft P messen wir einmal durch die Grösse der von ihr einem Körper ertheilten Beschleunigung: sie ist dieser proportional; sodann auch durch die bewegte Masse: sie ist letzterer gleichfalls proportional. Wirkt dieselbe Kraft, etwa die einer gespannten und dann losgelassenen Feder, auf verschieden grosse Massen, so erzeugt sie Beschleunigungen b, die umgekehrt proportional den bewegten Massen m sind, es ist also:

$$P = const\, m \, . \, b \quad \text{. . . . .} \quad (1)$$

Die Kraft ist nach Gleichung (1) Masse $\times$ Beschleunigung, ihre Dimension ist also: $[m^1 l^1 t^{-2}]$.

Statt die auf Körper wirkenden Kräfte durch die von ihnen erzeugten Beschleunigungen zu messen, kann man sie auch durch die Drucke messen, welche die Körper auf eine die Bewegung hindernde, zur Richtung der Kraft senkrechte, festliegende Ebene ausüben.

Zur Messung der Kräfte benutzt man zwei Systeme: 1. das absolute, 2. das praktische.

Bei dem absoluten Maasssystem tritt in die Definition der Einheit der Kraft allein die Masse und die Beschleunigung ein, bei dem praktischen geht man von den Wirkungen einer bestimmten Kraft, der Schwere, aus.

1. In dem absoluten System ist die Einheit der Kraft, die Dyne $\varDelta$, diejenige Kraft, welche der Masse von 1 gr die Beschleunigung von 1 cm in einer Secunde ertheilt, es ist also in der obigen Gleichung $const = 1$ und $\varDelta = 1 \, . \, 1 = 1$ gr cm sec^{-2}. Eine Dyne ist auch gleich dem Drucke, welchen ein Körper, auf den sie wirkt, auf eine zu ihrer Richtung senkrechte Ebene ausübt.

2. Die Schwere wirkt auf Massen aller Art in derselben Weise, sie ertheilt allen die gleiche Beschleunigung, wie die gleiche Fallgeschwindigkeit derselben im luftleeren Raume zeigt. Dies ist eine specielle Eigenschaft der Schwere; bei magnetischen und elektrischen Kräften ist eine solche Unabhängigkeit der Wirkung von der Natur der Körper nicht vorhanden.

Als praktische Einheit E_p der Kraft definirt man diejenige, welche von der Schwere auf die Masse von 1 cbcm Wasser, also 1 gr, ausgeübt wird, und nennt dieselbe 1 gr. Ist g die Beschleunigung durch die Schwere, $g = 981{,}3$ cm sec^{-2}, so ist

$$E_p = 1 \text{ gr} = 1 \, . \, g \text{ Dyne}$$

und die Kraft, die von der Schwere auf irgend eine Masse m ausgeübt wird:

$$P' = m \, . \, g.$$

1 gr als Kraft ist aber auch gleich dem Drucke, den die Masse von 1 gr auf eine horizontale Ebene ausübt. Der Druck, den die Masse m auf eine ebensolche Fläche ausübt, ist $m.g$, er ist m mal so gross als der von der Masseneinheit ausgeübte; man kann daher durch die von den Massen ausgeübten Drucke die Grössen von Massen vergleichen; dies geschieht bei den Wägungen. Den von der Masse m unter dem Einfluss der Schwerkraft ausgeübten Druck nennt man auch kurz das Gewicht P des Körpers; es ist $P = m.g$.

Die praktische Einheit 1 gr ist also $g = 981{,}3$ oder rund 1000 mal so gross als die absolute, die Dyne ist demnach gleich dem Drucke von $^1/_{981,3}$ gr oder rund $^1/_{1000}$ gr auf die Unterlage.

Gesetze der gleichförmig beschleunigten Bewegung.

Ein Körper beginne seine geradlinige, gleichförmig beschleunigte Bewegung zur Zeit $t = 0$. Für diese Zeit $t = 0$ ist dann der zurückgelegte Weg $s = 0$ und die Geschwindigkeit $v = 0$. Die Beschleunigung sei g. Dann gelten die Sätze:

1. Die Geschwindigkeiten wachsen direct proportional den Zeiten: $v = gt$.

2. Die zurückgelegten Strecken s wachsen direct proportional den Quadraten der Zeiten $s = {}^1/_2\,gt^2$.

3. Die Geschwindigkeiten wachsen proportional den Quadratwurzeln aus den zurückgelegten Strecken $v = \sqrt{2gs}$.

Der Satz 3. ergiebt sich aus den beiden ersten.

Wirkt eine constante Kraft auf einen Körper in der Richtung seiner Bewegung, so ist seine Bewegung eine gleichförmig beschleunigte; sobald die Kraft aufhört zu wirken, wird die Bewegung eine gleichförmige: die Geschwindigkeit ist constant.

Prüfung der Fallgesetze.

Ein unter dem Einflusse der Schwere frei fallender Körper hat eine gleichförmig beschleunigte Bewegung. Für seine Bewegung gelten daher, wenn er keine Anfangsgeschwindigkeit besass, folgende Sätze:

1. Die Geschwindigkeiten wachsen wie die Fallzeiten. 2. Die Fallräume wachsen wie die Quadrate der Fallzeiten. 3. Die Geschwindigkeiten wachsen wie die Quadratwurzeln aus den Fallräumen.

Princip der Methode. Ueber eine Rolle, von der wir annehmen, dass sie sich ohne Reibung um ihre Axe dreht, und dass ihre ganze Masse μ sich auf den Rand concentrirt (die Speichen also sehr dünn sind), legen wir eine Schnur; an die beiden Enden der letzteren hängen wir gleiche Gewichte A und B von den Massen M. Dieselben halten sich das Gleichgewicht. Legen wir auf eine derselben eine Masse m, so ist die Kraft, die letzterer entspricht, mg. Würde diese Kraft nur die Masse m zu bewegen haben, so würde sie ihr eine Beschleunigung b ertheilen, die bestimmt ist durch $mg = mb$; $b = g$, d. h. der Körper

würde die Beschleunigung g erhalten. Die Kraft mg hat aber ausser der eigenen Masse m noch die Massen von A und B und der Rolle, d. h. $2M + \mu$ zu bewegen. Die Beschleunigung g'_1 des Körpers ist daher bestimmt durch

$$m \cdot g = (2M + m + \mu)\, g'_1$$

$$g'_1 = \frac{mg}{2M + m + \mu}.$$

Die Beschleunigung g'_1 ist also $m/(2M + m + \mu)$ mal kleiner als diejenige beim freien Fall g.

In Folge dieser Verkleinerung der Beschleunigung kann man die durch die Schwerkraft erzeugten Bewegungen leicht untersuchen. Während beim freien Fall der in der ersten Secunde durchlaufene Weg etwa 5 m beträgt, so beträgt er, wenn $m/(2M + m + \mu) = {}^1/_{100}$ ist, nur 5 cm.

Apparat. Atwood'sche Fallmaschine, Fig. 20. Auf einem mit einer Centimetertheilung versehenen Gestell, wie es die Figur zeigt, steht eine sehr leicht bewegliche Rolle. Ueber derselben liegt ein dünner Faden, an dessen Enden Gewichte m und n angehängt werden; über diese können Scheiben von grösserem Durchmesser,

Fig. 20. Fig. 21.

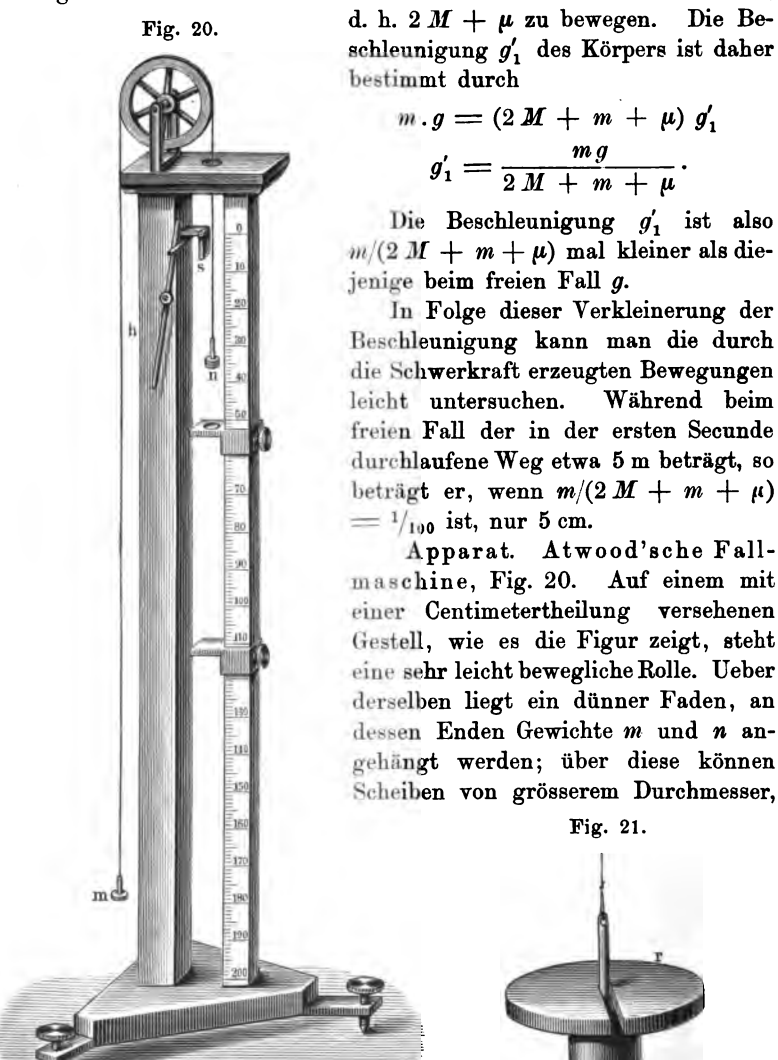


Fig. 21, die mit einem Schlitz versehen sind, übergeschoben werden. Längs der Theilung lassen sich zwei Schieber verschieben, von denen der eine mit einer kreisförmigen Oeffnung versehen ist, durch die die Gewichte, nicht aber die Uebergewichte hindurchgehen, während der andere nicht durchbohrt ist. Oben an der Säule befindet sich am

Anfangspunkte der Theilung ein um eine horizontale Axe drehbares Blech, das durch einen Hebel h in horizontaler Lage gehalten wird; dreht man den Hebel, so fällt es in die verticale Lage. Ein auf das Blech gesetztes und mit einem Uebergewicht versehenes Gewicht fällt beim Drehen des Hebels mit zunehmender Geschwindigkeit herab; geht es durch den Schieber mit der Oeffnung, so wird das Uebergewicht abgenommen, und das Gewicht sinkt mit derjenigen Geschwindigkeit weiter, die es im Momente des Abnehmens besass.

Neben der Atwood'schen Fallmaschine stellt man ein Secundenpendel mit Anschlag auf.

Uebung 1. Bestimmung von g'_1 und g und Prüfung des Gesetzes der Fallräume.

1) Man wägt die Gewichte M, die Rolle μ und eines der Uebergewichte m_1.

2) Die Säule wird mittels der Fussschrauben vertical gestellt.

3) Man setzt das eine mit dem Uebergewichte m_1 versehene Gewicht auf das Blech.

4) Den nicht durchbrochenen Schieber stellt man möglichst weit unten an die Säule der Atwood'schen Fallmaschine.

5) Man setzt das Pendel in Gang und zählt bei jedem Schlage Null, Null, ...; bei einem bestimmten Schlage Null schlägt man den Hebel zur Seite und zählt weiter 1, 2 ... x, bis das Gewicht auf den Schieber aufschlägt.

6) Den Schieber verschiebt man so lange, bis das Aufschlagen gerade am Ende einer, etwa der $t$ten Secunde erfolgt und liest die Fallhöhe, den zugehörigen „Fallraum", l ab.

7) Aus dem Fallraume l und der Fallzeit t berechnet man den Werth von g'_1 und prüft, ob in der That $g'_1 = m/(2M + m + \mu) \cdot 981{,}3$ cm ist (was freilich meist nur sehr angenähert der Fall ist).

8) Man berechnet mit dem gefundenen Werthe von g'_1 die Fallräume s_1 s_2 s_3 nach der Zeit 1, 2, 3 sec, stellt die Schieber auf diese Stellen s_1 s_2 s_3 ... und prüft wie bei 4) u. s. w., ob die Fallzeiten 1, 2, 3... sec betragen.

Uebung 2. Prüfung des Gesetzes der Fallgeschwindigkeiten. 1) Man misst die Höhe h des Gewichtes M.

2) Den durchbohrten Schieber stellt man auf $s_1 - h$; dann wird das Uebergewicht abgenommen, nachdem das System $(2M + m_1 + \mu)$ die Strecke s_1 durchlaufen hat.

3) Man stellt den nicht durchbohrten Schieber auf $s_1 + g'_1$, $s_1 + 2g'_1$, $s_1 + 3g'_1$ u. s. f.

4) Nun lässt man das Gewicht mit dem Pendelschlag fallen: es schlägt nach 1, 2, 3 Secunden auf das untere Blech. Die Geschwindigkeit des gleichförmig fallenden, von keiner Kraft mehr bewegten Systems ist also

$$v = g'_1.$$

5) Man stellt den durchbohrten Schieber auf $s_2 - h$, dann wird das Uebergewicht abgenommen, nachdem das System die Strecke s_2 durchfallen hat.

6) Der volle Schieber wird auf $s_2 + 2g'_1$, $s_2 + 2.2g'_1$, $s_2 + 3.2g'_1$ u. s. f. gestellt.

7) Man lässt das Gewicht mit einem Pendelanschlag fallen: es schlägt nach 1, 2, 3 ... Secunden auf den nicht durchbohrten Schieber. Die Geschwindigkeit ist also

$$v = 2g'_1.$$

8) Der durchbrochene Schieber wird auf $s_3 - h$ gestellt, der Versuch wiederholt; die Geschwindigkeit ist

$$v = 3g'_1.$$

9) Man stellt dieselben Uebungen mit einem anderen Uebergewichte m_2 an und bestimmt mit diesem g'_2. Dann muss $g'_1 : g'_2 = m_1 : m_2$ sein.

Beispiel: $2M = 97{,}30$, $\mu = 36{,}04$, $m_1 = 3{,}47$ gr. Durch Verschieben des nicht durchbohrten Schiebers wurde das Aufschlagen nach $t = 4$ Secunden bei $l = 195$ beobachtet, also $g'_1 = 24{,}4$ cm. $981{,}3\,m_1/(2M + m_1 + \mu) = 25$, also nahe gleich g'_1. Hieraus wurde berechnet und durch den Versuch bestätigt: $s_1 = 12{,}2$; $s_2 = 48{,}8$; $s_3 = 109{,}8$; $s_4 = 195$ cm. $h = 2{,}4$ cm; $s_1 - h = 9{,}8$; $s_1 + g'_1 = 36{,}6$; $s_1 + 2g'_1 = 61{,}0$; $s_1 + 3g'_1 = 85{,}4$; $s_2 - h = 46{,}4$; $s_2 + 2g'_1 = 97{,}6$; $s_2 + 2.2g'_1 = 146{,}4$; $s_3 - h = 107{,}4$; $s_3 + 3g'_1 = 183{,}0$ cm. $m_2 = 1{,}71$ gr. Ferner wurde für $t = 5$ sec gefunden $l = 150$, also $g'_2 = 12$. Es ist $m_1 : m_2 = 2$, $g'_1 : g'_2$ ebenfalls nahezu $= 2$.

Allgemeines. 1. Bewegt eine Kraft P einen Körper in ihrer eigenen Richtung längs eines Weges s, so leistet sie eine Arbeit $A = P.s$. Die Arbeit ist gleich dem Producte aus Kraft mal Weg, sie hat also die Dimension $[lmt^{-2} \times l] = [l^2mt^{-2}]$. Die Einheit der Arbeit ist diejenige, welche die Einheit der Kraft leistet, wenn sie einen Körper längs der Einheit des Weges bewegt. Legt man die absoluten Einheiten (cm, gr, sec) zu Grunde, wo die Einheit der Kraft 1 Dyne ist, so ist die Arbeitseinheit diejenige, welche 1 Dyne längs 1 cm leistet. Diese Einheit heisst 1 Erg. Dabei ist es ganz gleichgültig, in welcher Zeit die Arbeit geleistet wird. Legt man die praktischen Einheiten Kilogramm und Meter zu Grunde, so ist die Arbeitseinheit das Meterkilogramm.

Die Arbeit, die in der Zeiteinheit geleistet wird, heisst der Effect; die praktische Einheit des Effectes ist 1 Watt $= 10^7$ Erg pro Secunde, da 1 Erg pro Secunde eine zu kleine Einheit sein würde.

Die Arbeitsleistung von 75 Meterkilogrammen in der Secunde $= 7{,}36.10^9$ Erg $= 736$ Watt heisst Pferdekraft.

2. Heben wir ein Gewicht P entgegen der Schwere auf die Höhe s, so leisten wir eine Arbeit Ps; in dem Gewichte P ist dann ein Arbeitsvorrath Ps vorhanden; denn von der Höhe s herabsinkend, vermag P ein gleich grosses Gewicht $P_1 = P$ auf die Höhe $s_1 = s$ zu heben, z. B. an der Rolle. Die in P vorhandene Arbeit wird dabei verbraucht und

an P_1 geleistet. Beim Hebel, Flaschenzug etc. sind P und P_1, s und s_1 nicht gleich, stets ist aber $Ps = P_1 s_1$, immer ist die geleistete Arbeit gleich der verbrauchten.

Den durch die Lage von P gegenüber der Erde in dessen Gewicht vorhandenen Arbeitsvorrath nennt man seine potentielle Energie, Energie der Lage, auch Distanzenergie Π.

Lassen wir den Körper vom Gewicht P, also der Masse $m = P/g$, durch die Strecke s frei fallen, so erlangt er dabei eine Geschwindigkeit v, die potentielle Energie verwandelt sich in Energie der Bewegung: kinetische oder actuelle Energie [1]):

$$K = \frac{1}{2} m v^2.$$

(Da nach S. 31 $v = \sqrt{2gs}$ ist, so ist in der That $Ps = \frac{1}{2} m v^2$.)

An jeder Stelle der Strecke s ist gleichzeitig potentielle und kinetische Energie Π_1 und K_1 vorhanden, und zwar ist stets:

$$K = \Pi_1 + K_1 = \Pi.$$

Die Summe der kinetischen und potentiellen Energie ist constant.

Dieser Satz gilt für alle mechanischen, thermischen, optischen, elektrischen, magnetischen und chemischen Erscheinungen, überhaupt für alle Erscheinungen, und heisst das Princip von der Erhaltung der Energie. Nach demselben kann keine neue Energie geschaffen, sondern nur die vorhandene Energie in neue Formen übergeführt werden.

Man kann aber nicht sagen, man verwandelt Wärme in Elektricität, sondern man muss sagen, die Energie der Wärme wird in die Energieform der Elektricität etc. verwandelt.

2. Das Pendel.

Gebraucht wird: Drei 1 m lange Pendel mit bezw. einer grossen und einer kleinen Bleikugel und einer Wachskugel; 6,25, 25, 56,25, 100 cm lange Pendel; grosse Messingkugel mit Haken; Seidenfaden; durchbohrte Stahlplatte zum Anschrauben; Chronoskop; Schubleere; Rechtwinkellineal.

Einleitung. Ein Pendel nennt man jeden Körper, der um eine nicht durch seinen Schwerpunkt gehende Axe schwingen kann.

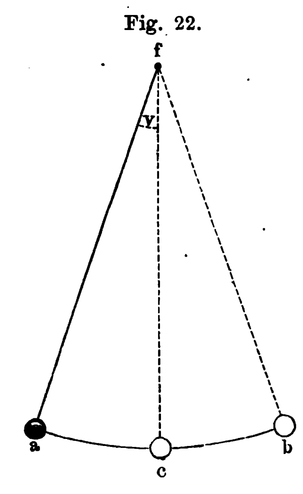
Das einfache Pendel, Fig. 22 (a. f. S.), besteht aus einem kleinen Körper, z. B. einer Kugel a, der an einem dünnen Faden fa aufgehängt ist. Denkt man sich den Körper durch einen schweren materiellen Punkt ersetzt, der an einem gewichtslosen Faden hängt, so nennt man diese Anordnung ein mathematisches Pendel; hat der schwingende Körper eine beliebige Gestalt, so heisst sie ein physisches Pendel.

Bringt man das Pendel aus seiner Ruhelage fc in die Lage fa und lässt es los, so durchläuft die Kugel a den Bogen ac mit zunehmender

[1]) Die ältere Bezeichnung „lebendige Kraft“ ist als unzweckmässig zu verlassen.

Geschwindigkeit, kommt bei c mit einer solchen Geschwindigkeit an, dass sie auf der anderen Seite der Ruhelage bis zu einem Punkte b steigt, der ebenso weit von c entfernt ist wie a, kehrt dann um und schwingt bis a zurück u. s. f. Eine Schwingung oder Oscillation ist die Bewegung von a bis b oder von b bis a, die Schwingungsdauer oder Oscillationsdauer ist die Zeit, welche das Pendel braucht, um einen Hingang oder Hergang auszuführen [1]), Amplitude ist der Bogen $ca = cb$, d. h. der grösste Ausschlag des Pendels (vgl. S. 9).

Fig. 22.



Für die Bewegung des Pendels gelten nach Galilei die folgenden Gesetze:

1. Bei nicht zu grossen Amplituden ist die Schwingungsdauer (nahezu) unabhängig von der Amplitude. Die Schwingungen sind isochron.

2. Die Schwingungsdauer ist unabhängig von der Natur der Substanz des Pendels.

3. Die Schwingungsdauern verschieden langer Pendel verhalten sich wie die Quadratwurzeln aus den Pendellängen.

Ein Pendel, dessen Schwingungsdauer genau eine Secunde beträgt, heisst Secundenpendel; ein Pendel von 1 m Länge ist nahezu ein solches.

1. Prüfung der Pendelgesetze.

Apparat. An drei Fäden von 1 m Länge sind an einer horizontalen Leiste eine grössere, eine kleinere Bleikugel und eine Wachskugel aufgehängt. An einer zweiten Leiste hängen ebensolche Pendel, deren Längen (6,25, 25, 56,25, 100 cm) sich wie 1 : 4 : 9 : 16 verhalten. — Wo es sich darum handelt, in bestimmten Intervallen von $^1/_4$, $^1/_2$, 1 Minute Erscheinungen zu beobachten, benutzen wir eine passend umgeänderte Pendeluhr, wie sie zur Erläuterung der Construction derselben in der Vorlesung benutzt wird. Dieselbe giebt in einem der genannten Intervalle Glockenzeichen. An den verticalen Träger des Werkes ist unmittelbar unter der Zifferscheibe und dem Zeiger ein kleines, mit einem Rande umgebenes Holzbrett an zwei Stäben befestigt, zwischen denen die Schnüre für die Gewichte und das Pendel sich befinden. In dasselbe ist eine kleine Rinne geschnitten,

[1]) Bei anderen schwingenden Bewegungen, so beim Lichte, bezeichnet man den Hin- und Hergang, also die Bewegung *abba*, als eine Schwingung und als Schwingungsdauer die Zeit, die zum Hin- und Hergange nöthig ist.

in die etwas Quecksilber gebracht wird. Letzteres, sowie die Axe, welche die Zeiger trägt, ist in einen Stromkreis geschaltet mit zwei kleinen Leclanché-Elementen und einer elektrischen Klingel, die an dem Ständer der Uhr aufgehängt ist. Auf die Zeigeraxe wird, je nachdem jede Minute, halbe Minute, viertel Minute etc. angezeigt werden soll, ein dem Radius oder dem Durchmesser entsprechender Messingzeiger oder ein Messingkreuz gesetzt. Sobald eine der Spitzen derselben in das Quecksilber taucht, wird der Strom geschlossen und die Klingel ertönt.

Uebung. 1) Man setzt das Uhrwerk in Gang, bringt die Kugel des Pendels mit der grossen Bleikugel etwas aus der Ruhelage und lässt in dem Moment, wo ein Klingeln ertönt, das Pendel los, indem man mit 0 anfängt zu zählen.

2) Wenn das Pendel wieder in seine Anfangslage kommt, so zählt man 1, 2, 3..., bis nach einer bestimmten Zeit von z Secunden von Neuem das Klingeln ertönt. Hat man bis x gezählt, so hat das Pendel x Hingänge und x Hergänge, also $2x$ Schwingungen ausgeführt; die Schwingungsdauer ist:

$$T = z/2x.$$

3) Man giebt dem Pendel eine grössere Amplitude und verfährt wie bei 1) und 2). Die Schwingungsdauern sind nahezu gleich: Satz 1.

4) Die Schwingungsdauern werden für jedes der drei ersten Pendel von verschiedener Substanz von gleicher Länge bestimmt, sie sind gleich: Satz 2.

5) Die Schwingungsdauern T_1 T_2 T_3 T_4 der vier Pendel von den Längen 1, 4, 9, 16 werden bestimmt; es ergiebt sich $T_1 = 0{,}25$ sec, $T_2 = 0{,}5$ sec, $T_3 = 0{,}75$ sec, $T_4 = 1$ sec, d. h. die Schwingungsdauern verhalten sich wie $1:2:3:4 = \sqrt{1} : \sqrt{4} : \sqrt{9} : \sqrt{16}$: Satz 3.

2. Bestimmung der Beschleunigung durch die Schwere.

Princip. Ausser von der Länge hängt die Schwingungsdauer noch von der Anziehungskraft der Erde an dem Beobachtungsorte ab. Ist g die Beschleunigung durch die Schwere und L die Pendellänge, so ist die Schwingungsdauer

$$T = \pi \sqrt{L/g}.$$

Bei gegebenem L kann man aus der Schwingungsdauer T die Grösse g bestimmen.

Apparat. Eine homogene Messingkugel mit einem kleinen Haken wird an einem möglichst langen, ungedrillten Seidenfaden aufgehängt. Der Faden wird oben durch eine feine, in eine Metallplatte gebohrte Oeffnung gezogen und oberhalb der Oeffnung an der Platte befestigt. Diese selbst wird an der Zimmerdecke festgeschraubt. Die Schwingungsdauern werden mit dem Chronoskop gemessen.

Uebung 1. Man vergleicht das zur Zeitbestimmung zu verwendende Chronoskop mit einer Taschenuhr, die Secunden zeigt: Man setzt das Chronoskop mit der vollen Minute in Gang und arretirt es nach einer bestimmten Zeit. Zeigt dasselbe a_1 Secunden, die Taschenuhr a_2 Secunden, so ist der Werth einer an dem Chronoskop abgelesenen Secunde

$$\sigma = a_2/a_1.$$

Uebung 2. 1) Man legt um die Kugel eine Bindfadenschlinge, zieht mit derselben das Pendel aus seiner Gleichgewichtslage und befestigt den Faden an der Schlinge an einem in geeigneter Höhe in die Wand geschlagenen Nagel, so dass die Amplitude des Pendels etwa 10 Grad beträgt.

2) Wenn die Kugel vollkommen zur Ruhe gekommen ist, brennt man den Faden neben der Kugel durch.

3) Das Chronoskop setzt man in dem Momente in Bewegung, in dem das Pendel durch seine Ruhelage hindurchgeht und zählt, mit Null beginnend, eine grössere Anzahl (z) Schwingungen, arretirt das Chronoskop und liest die Gesammtdauer t der z Schwingungen ab. Dann ist die Dauer einer Schwingung $T = t/z$, wobei z eventuell durch Division durch σ vorher auf Secunden zu reduciren ist, falls das Chronoskop nicht genau Secunden zählt.

4) Neben dem Pendel wird eine Holzlatte in verticaler Stellung befestigt; man schiebt an derselben ein Rechtwinkellineal entlang, visirt über die obere Kante des horizontalen Schenkels nach dem oberen und nach dem unteren Ende des Fadens und macht in den betreffenden Höhen horizontale Bleistiftstriche auf der Holzlatte.

5) Man misst die Entfernung der beiden Striche auf die Holzlatte: L' cm.

6) Misst man den Durchmesser D der Kugel mit der Schubleere (S. 14), so ist die Entfernung L des Schwerpunktes der Kugel vom Aufhängepunkte $L = L' + {}^1/_2 D$ und

$$g = \pi^2 . L/T^2.$$

Bemerkung. Will man dem Umstande Rechnung tragen, dass streng genommen das hier verwendete Pendel nicht ein mathematisches, sondern ein physisches ist, so muss man die Dimensionen der Kugel berücksichtigen, und hat der Länge L noch die kleine Correction

$$\varepsilon = 0{,}1 . D^2/L$$

zuzufügen. Dann wird

$$g = \pi^2 . (L + \varepsilon)/T^2.$$

Beispiel: $z = 400$; $t = 12^{\text{m}}\ 12^{\text{sec}}$; $T = 1{,}830$; $L' = 330{,}1$ cm; $D = 4{,}8$ cm; $L = 332{,}5$; $g = 979{,}9$; $\varepsilon = 0{,}0069$, also zu vernachlässigen.

III. Die Waage.

Einleitung.

Gebraucht wird: Modell für die Schwerpunktslagen, bestehend aus zwei rechteckigen Brettchen und Gabel; Hebelmodell mit Gewichten zum Anhängen.

I. Der Schwerpunkt.

In Folge der Schwerkraft wirken auf alle einzelnen Theile eines Körpers parallele Kräfte, nämlich die Gewichte derselben. Diese lassen sich zu einer Resultante, dem Gesammtgewichte, zusammensetzen. Die Resultante greift, wie man auch den Körper drehen mag, stets in ein und demselben Punkte, dem Schwerpunkte, an.

Ein Körper kann auf dreierlei Art in einem Punkte unterstützt werden, so dass er unter dem Einflusse der im Schwerpunkte angreifenden Resultante keine Bewegung ausführt, sich also im Gleichgewicht befindet.

1. Schwerpunkt und Unterstützungspunkt fallen zusammen: indifferentes Gleichgewicht, der Körper bleibt in jeder Lage in Ruhe. 2. Der Schwerpunkt liegt vertical unter dem Unterstützungspunkte: stabiles Gleichgewicht. Bringt man den Körper aus der Lage des stabilen Gleichgewichtes, so kehrt er, sich selbst überlassen, nach einigen Schwingungen wieder in diese zurück. 3. Der Schwerpunkt liegt vertical über dem Unterstützungspunkte: labiles Gleichgewicht. Bringt man den Körper aus dieser Lage heraus, so kehrt er nicht in dieselbe zurück, sondern geht in die Lage des stabilen Gleichgewichtes über.

Uebung. Man erläutert diese Verhältnisse an zwei rechteckigen, überall gleich dicken Brettchen. Bei diesen liegt der Schwerpunkt in dem Durchschnittspunkte der beiden Diagonalen. Bei dem einen geht ein Stift gerade durch diesen Punkt, bei dem anderen geht ein solcher seitlich neben dem Schwerpunkte durch dasselbe. Mit den Stiften werden die Brettchen in eine Gabel gehängt. Das erste erläutert das indifferente Gleichgewicht, das zweite das stabile und labile Gleichgewicht.

II. Das Hebelgesetz.

Der geradlinige Hebel ist eine um eine Axe drehbare Stange, an der Kräfte angreifen, die sich unter bestimmten Verhältnissen das

Gleichgewicht halten. Man unterscheidet ein- und zweiarmige Hebel. Bei den ersteren liegen die Angriffspunkte zweier Kräfte auf derselben Seite der Axe, bei den letzteren auf verschiedenen Seiten; liegt die Axe in der Mitte zwischen beiden, so heisst der Hebel gleicharmig, liegt sie in einem anderen Punkte, so heisst er ungleicharmig.

Statisches Moment ist das Product aus Kraft P und Abstand des Angriffspunktes der Kraft vom Drehpunkte des Hebels (Hebelarm) l.

Greifen an einem zweiarmigen, geradlinigen Hebel senkrecht zu seiner Richtung auf beiden Seiten der Axe parallel gerichtete Kräfte an [1]), wie z. B. an einem horizontalen Hebel die vertical nach unten ziehenden Kräfte angehängter Gewichtsstücke, so gilt der Satz:

Gleichgewicht ist an dem zweiarmigen Hebel vorhanden, wenn die statischen Momente auf beiden Seiten der Axe einander gleich sind, d. h. wenn die statischen Momente von Kraft und Last einander gleich sind. Dasselbe muss beim Gleichgewicht des einarmigen Hebels der Fall sein.

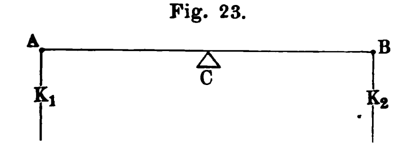
Wenn an dem linken Hebelarm l_l das Gewicht P_l, an dem rechten Hebelarm l_r das Gewicht P_r angreift, so ist Gleichgewicht vorhanden, wenn

$$P_l l_l = P_r l_r \text{ ist.}$$

Greifen mehrere Kräfte an, so müssen beim Gleichgewicht die Summen der statischen Momente auf beiden Seiten einander gleich sein.

Um das Hebelgesetz zu prüfen, müsste man eigentlich die Kräfte an einer gewichtslosen Stange AB (Fig. 23) angreifen lassen, weil sonst das im Schwerpunkte des Hebels angreifende Gewicht desselben als Kraft mit zu berücksichtigen ist. Befestigt man indess einen parallelepipedischen Stab in seiner Mitte, so dass er sich um eine durch seinen Schwerpunkt gehende Axe dreht, er also im indifferenten Gleichgewicht ist, so kann man von seinem Eigengewichte absehen. Man bringt längs der Mittellinie eines solchen Stabes auf beiden Seiten eine Reihe von Stiften an, die gleich weit von einander abstehen, und hängt Gewichte an dieselben.

Fig. 23.



Uebung 1. An einem solchen Hebel prüft man durch angehängte Gewichte den Satz der statischen Momente.

Uebung 2. Man bringt an einem Stativ oberhalb des einen Hebelarmes eine Rolle an, schlingt über dieselbe einen mit zwei Oesen

[1]) Greift die Kraft nicht senkrecht zu der Richtung des Hebels an, so tritt an Stelle des statischen Momentes das Drehungsmoment; dies ist das Product aus der Kraft P in den senkrechten Abstand der Richtung der Kraft von der Drehungsaxe des Hebels.

versehenen Faden, die eine Oese schiebt man über einen der Stifte am Hebel, an die andere Oese hängt man Gewichte. Man hängt ferner Gewichte an die einzelnen Stifte desjenigen Hebelarmes, über dem die Rolle sich befindet, und prüft das Gesetz der statischen Momente für den einarmigen Hebel in derselben Art, wie für den zweiarmigen.

III. Princip der Waage und des Wägens.

Die gewöhnlich benutzte Waage ist ein zweiarmiger, gleicharmiger Hebel (Waagebalken), dessen Schwerpunkt unter dem Unterstützungspunkte liegt, der sich also im stabilen Gleichgewicht befindet, und an dessen Enden in gleichen Abständen vom Unterstützungspunkte Vorrichtungen zum Auflegen der Gewichte, Waagschalen, angebracht sind.

Bei einer guten Waage dient als Unterstützung des Waagebalkens eine Schneide, ebenso werden die Waagschalen von Schneiden getragen.

Liegen keine Gewichte auf den Schalen, so steht der Waagebalken horizontal; ein zu demselben senkrecht stehender Zeiger spielt über einem bestimmten Punkte einer Theilung. Stellt man auf die eine Schale ein Uebergewicht, so dreht sich der Waagebalken. Gleichgewicht tritt ein, wenn das Drehungsmoment des im Schwerpunkte vereinten Gewichtes des Waagebalkens gleich dem Drehungsmoment des Uebergewichtes ist. Bringt man auf die zweite Schale ein dem ersten Gewichte gleiches, so kehrt die Waage wieder in ihre Gleichgewichtslage zurück. Hierauf beruht im Wesentlichen das Wägen. Man legt in die eine Waagschale den Körper, dessen Gewicht gefunden werden soll, und in die andere so viel Gewichte, bis wieder Gleichgewicht eingetreten ist.

Um möglichst genaue Wägungen ausführen zu können, muss die Waage empfindlich sein, d. h. schon ein geringer Unterschied zwischen den Gewichten auf der rechten und linken Waagschale muss sich bemerklich machen.

Definition: Die Empfindlichkeit einer Waage wird durch die Grösse des Ausschlages gemessen, den ein auf die eine Seite gebrachtes Uebergewicht Eins hervorruft.

IV. Theorie der Waage.

AB (Fig. 24, a. f. S.) sei der um die Schneide C sich drehende Waagebalken, s_1 und s_2 seien die Schneiden, an denen die Waagschalen aufgehängt sind, welche sich bei horizontaler Lage des Waagebalkens in den Abständen l_1 und l_2 von der durch s gelegten Verticalebene befinden; s_1 möge in dem Abstande x, s_2 in dem Abstande y von der durch s gelegten Horizontalen sein; der Schwerpunkt S des Waagebalkens befinde sich im Abstande z von C, das Gewicht des letzteren sei Q. Verhalten sich die Summen P_1 und P_2 der Gewichte der Schalen und der darauf liegenden Gewichte wie $l_2 : l_1$, ist also $P_1 l_1 = P_2 l_2$, so ist die Waage im Gleichgewicht. Legt man bei B ein Uebergewicht p auf,

so schlägt die Waage um einen Winkel α aus, der bei kleinen Winkeln bestimmt ist (falls α in der S. 25 angegebenen Weise gemessen ist) durch die Gleichung:

$$(l_1 + x\alpha) P_1 + zQ\alpha = (l_2 - y\alpha)(P_2 + p),$$

Fig. 24.

denn dann ist das Drehungsmoment der Kräfte P_1 und Q links von C gleich dem Drehungsmoment der Kraft $P_2 + p$ rechts von C. Danach ist der Ausschlag

$$\alpha = \frac{l_2 p}{xP_1 + zQ + yP_2 + yp}.$$

Die Empfindlichkeit, d. h. der Ausschlag für ein Uebergewicht 1, ist:

$$\alpha' = \frac{\alpha}{p} = \frac{l_2}{xP_1 + zQ + yP_2 + yp}.$$

Liegen, wie es bei guten Waagen der Fall sein soll, die drei Schneiden A, B, C in einer Ebene, so ist $x = y = 0$, und es wird, wie sich auch aus Fig. 25 ergiebt:

$$\alpha = \frac{l_2 p}{zQ}.$$

Der Ausschlag α ist direct proportional dem Uebergewicht p, der Länge l_2 des Waagebalkens CB, umgekehrt proportional dem Abstande z des Schwerpunktes des Waagebalkens vom Unterstützungspunkte und umgekehrt proportional dem Gewichte des Waagebalkens Q, und unabhängig von den Gewichten auf den Waagschalen.

Die Empfindlichkeit ist:

$$\alpha' = \frac{\alpha}{p} = \frac{l_2}{z\,Q}.$$

Die Empfindlichkeit ist direct proportional der Länge l der Balkenarme, umgekehrt proportional dem Gewicht Q des Waagebalkens und der Entfernung z des Schwerpunktes des Waagebalkens vom Unterstützungspunkte und unabhängig von der Belastung und dem Uebergewicht.

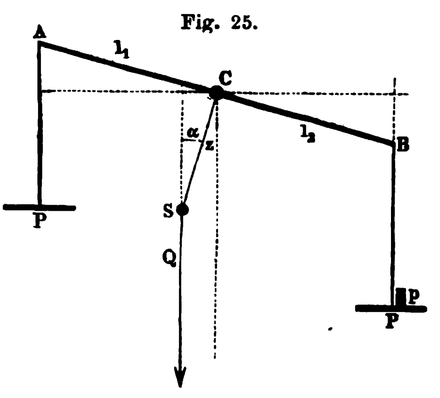


Fig. 25.

Liegen die drei Schneiden nicht in einer Ebene, so hängt die Empfindlichkeit von der Belastung P und dem Uebergewichte p ab.

Die eben aufgestellten Gesetze prüfen wir an einem von Weinhold und einem von Buff angegebenen Waagemodell.

1. Das Waagebalken-Modell nach Weinhold.

Gebraucht wird: Das Waagebalken-Modell; 5 Ein-Gramm-Haken; 5 Fünf-Gramm-Haken; zwei 50-Grammstücke mit Haken; zwei cylindrische, cylindrisch durchbohrte Messinggewichte, ein kleiner Drahtbügel.

Apparat, Fig. 26, a. f. S. A ist der Waagebalken, der an dem Stifte B in dem Haken C hängt, D der Zeiger, der auf der Scala E spielt. Er hat bei B zwei Löcher, B_1 und B_2; der Stift B kann in das eine oder in das andere gesteckt werden. Jedem der beiden Löcher entsprechend läuft längs des Waagebalkens eine Reihe von Stiften B' und B''. Der Stift bei b zeigt die Stelle an, wo der Schwerpunkt des Waagebalkens liegt. Steckt man den Stift B in B_1 oder B_2, so verändert man den Abstand zwischen Unterstützungspunkt und Schwerpunkt. Als Gewichte dienen Haken (Fig. 26 a) von 5 gr und 1 gr, die auf die Stifte B' oder B'' in verschiedenen Entfernungen von B gehängt werden können. Je nachdem man die Gewichte an Stifte, die mehr oder weniger weit von der Drehungsaxe abstehen, hängt, hat man eine Waage mit längeren oder kürzeren Hebelarmen. Auf den Stift b können kleine Messingcylinder geschoben werden; da diese im Schwerpunkte angreifen, wird das Gewicht des Waagebalkens vermehrt, aber die Lage des Schwerpunktes selbst nicht geändert. Das Stativ F wird so aufgestellt, dass bei unbelastetem Waagebalken der Zeiger auf Null zeigt.

Uebung. 1) Man befestigt den Stift B im unteren Loche B_1, hängt einen Grammhaken am ersten Stift der unteren Reihe auf; Aus-

schlag: $A = 0{,}8$ Scalentheile. Durch den Ausschlag von 0,8 Sc. ist die Empfindlichkeit der Waage bestimmt.

2) Darauf hängt man an den ersten Stift $p = 1, 2, 3, 4, 5$ gr und liest die zugehörigen Ausschläge α ab. Man findet: Der Ausschlag ist (sehr nahe) dem Uebergewichte p proportional. Die Empfindlichkeit (d. h. Ausschlag dividirt durch Uebergewicht) ist constant.

Die Gültigkeit dieser Proportion gestattet, an der Scala Bruchtheile des Gewichtes zu bestimmen (s. w. u.).

3) Zwei 50-Grammstücke werden auf jeder Seite an die ersten kleinen Stifte (der unteren Reihe) angehängt. Durch Aufsetzen eines Drahtbügels an die geeignete Stelle des Waagebalkens wird bewirkt, dass der Zeiger wieder auf den Nullstrich einspielt, falls ein Ausschlag eintritt. Die fünf Eingrammhaken werden an einen der beiden ersten Stifte gehängt. Der Ausschlag ist ebenso gross wie bei unbelasteter Waage: Die Empfindlichkeit ist also von der Belastung unabhängig, wenn die Angriffspunkte der Gewichte und der Drehpunkt des Waagebalkens in einer Ebene liegen.

Fig. 26.

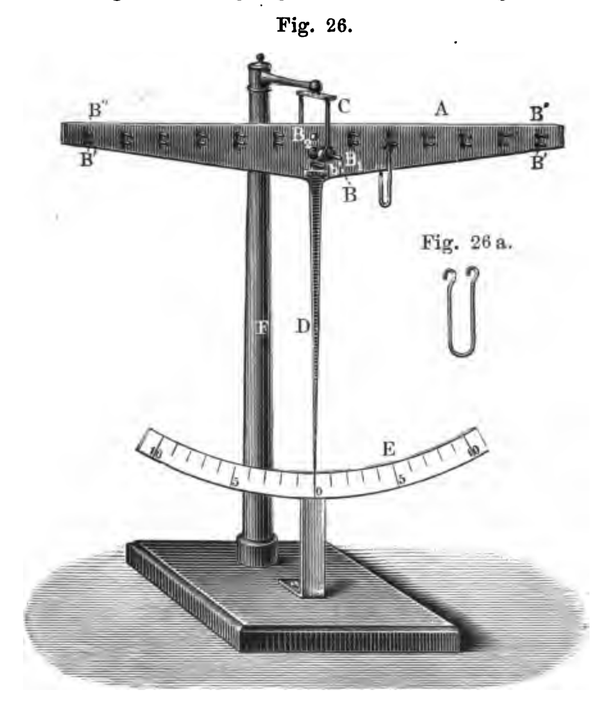


Fig. 26 a.

4) Für einen Grammhaken am 1. Stifte der unteren Reihe ist $\alpha = A$ Sc., am 2. Stifte $\alpha = 2A$ Sc., am 3. Stifte $\alpha = 3A$ Sc. u. s. w. Die Empfindlichkeit wächst also proportional mit der Balkenlänge. Hierauf beruht die Benutzung des Reiters (s. S. 50).

5) Die Axe B wird aus B_1 genommen. Die Entfernung von B_1 und B_2 vom Schwerpunkte b wird gemessen: $bB_1 = e$, $bB_2 = e'$ mm. Wird die Axe in B_2 statt in B_1 festgeschraubt, so ist ihre Entfernung vom Schwerpunkte im Verhältnisse von $e : e'$ vergrössert worden.

Ein Grammhaken wird am fünften Stifte der oberen (B'') Reihe aufgehängt; Ausschlag: $5A'$ Sc. Vorhin war der Ausschlag bei gleicher

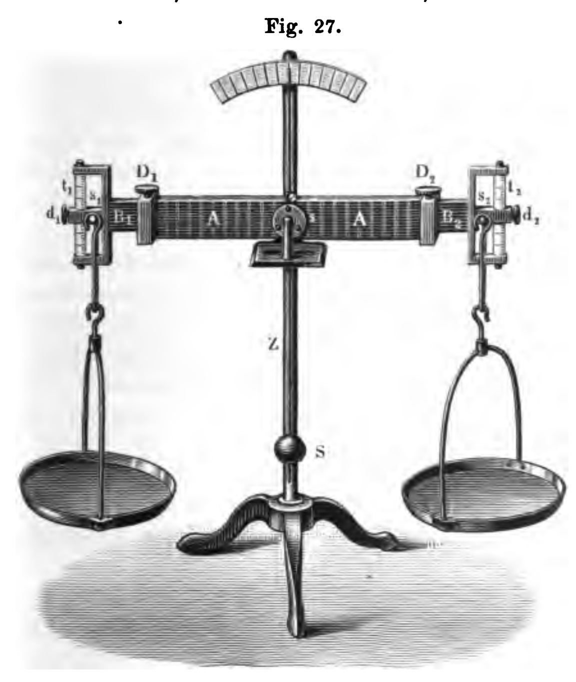
Entfernung des gleichen Uebergewichtes von der Axe $5A$, es ist $A':A = e:e'$: Die Empfindlichkeit ist umgekehrt proportional der Entfernung des Schwerpunktes vom Aufhängepunkte.

Ein Grammhaken wird am fünften Stifte der oberen Reihe aufgehängt; Ausschlag: M Sc. Die beiden cylindrischen Gewichte werden über die durch den Schwerpunkt gehenden Stifte geschoben, dadurch wird das Gewicht des Waagebalkens vermehrt ohne Verschiebung des Schwerpunktes; Ausschlag: m. Also ist die Empfindlichkeit vermindert im Verhältniss von $M : m$. Durch Wägung findet man: Gewicht des Balkens $= g$ gr; Gewicht des Balkens mit Cylindern: G gr. Man findet nahezu $G : g = m : M$, d. h.: Die Empfindlichkeit ist umgekehrt proportional dem Gewichte des Waagebalkens (bei unveränderter Lage des Schwerpunktes).

2. Das Waagemodell nach Buff.

Gebraucht wird: Waagemodell Fig. 27; Gewichtsstücke bis zum Gramm abwärts; zwei 200-Grammstücke; Gewichtsstück, welches das Hängen der Waage bei ungleichen Balkenlängen ausgleicht (siehe S. 47); Tarirschrot; Maassstab; Körper (circa 300 gr schwer) zum Wägen.

Fig. 27.



Apparat. Bei dem Waagemodell Fig. 27 kann man

1. die Schneiden s_1 und s_2, welche die Schalen tragen, und die mittelste Schneide s in eine Ebene bringen oder aus derselben entfernen; dazu löst man eine der Druckschrauben d_1 oder d_2 und schiebt das Messingklötzchen, welches die Schneide trägt, auf dem getheilten Stabe t_1 resp. t_2 auf oder ab und klemmt sie in irgend einer Lage fest;

2. den Schwerpunkt des Waagebalkens verlegen. An dem Stabe Z kann das kugelförmige Laufgewicht S durch eine Druckschraube an

einer beliebigen Stelle festgeklemmt werden. Je weiter man S hinaufrückt, um so näher rückt der Schwerpunkt des Waagebalkens und der mit ihm fest verbundenen Theile an den Unterstützungspunkt s;

3. die Länge der Balkenarme ss_1 und ss_2 verändern. Innerhalb des Waagebalkens A lassen sich die Stäbe B_1 und B_2 verschieben und durch die Schrauben D_1 und D_2 festklemmen.

Uebungen. a) Einfluss der Schneidenstellung. 1) Die beiden Schneiden s_1 und s_2 werden in die mittlere Lage gebracht (in der Gleichung S. 42 ist dann $x = y = 0$), und beide Balkenarme gleich lang gemacht. Auf eine Schale wird ein Grammstück gelegt; der Ausschlag α dient als Maass der Empfindlichkeit.

2) Auf die Schalen werden je 200 gr aufgesetzt; 1 gr Uebergewicht auf der einen Seite bewirkt wieder einen Ausschlag α, die Empfindlichkeit ist also unabhängig von der Belastung.

3) Eine Schneide wird aus der mittleren Lage herausgebracht [1]); auf die Schale der anderen wird 1 gr gelegt. Ausschlag: α'.

4) 200 gr werden auf beiden Seiten aufgesetzt. 1 gr Uebergewicht bewirkt jetzt einen anderen, geringeren Ausschlag α''; die Empfindlichkeit ändert sich also mit der Belastung, und zwar um so mehr, je mehr die Schneiden aus der mittleren Lage entfernt werden.

b) Einfluss der Lage des Schwerpunktes. Bei einer bestimmten höchsten Stellung des Laufgewichtes S sei der Ausschlag für ein Gramm Uebergewicht bei normaler Schneidenstellung $= \alpha$ Scalentheile. Man bringt das Laufgewicht in tiefere Lagen, schreibt die zu den einzelnen Stellungen gehörigen Ausschläge auf und achtet zugleich auf die Schnelligkeit der Schwingungen.

Die Empfindlichkeit der Waage nimmt ab, je weiter der Schwerpunkt vom Unterstützungspunkte entfernt ist. Umgekehrt schwingt die Waage schneller, je tiefer das Laufgewicht festgeschraubt wird.

c) Einfluss der Länge der Balkenarme. 1) Die Balkenarme B_1 und B_2 werden ganz eingeschoben, ihre Länge l gemessen. Das Laufgewicht S wird möglichst hoch befestigt und die Grösse des Ausschlages α bei 1 gr Belastung bestimmt.

2) Durch Ausziehen werden beide Balkenarme um gleichviel verlängert und dieselben Messungen ausgeführt. Die Empfindlichkeit nimmt proportional der Länge der Arme zu. Zugleich wächst die Schwingungsdauer der Waage.

d) Einfluss der Ungleicharmigkeit der Waage auf die Wägungen. Bei einer guten Waage sollen die Arme des Waagebalkens, d. h. die Entfernungen der zwei Schneiden an den Enden von der mittleren Schneide einander gleich sein. Dies ist aber nie ganz genau der Fall. Man nennt das Verhältniss der Balkenlängen R und L das Balkenverhältniss.

---

[1]) Dadurch wird auch die Lage des Schwerpunktes etwas geändert.

Sind die Abstände der Schneiden s_1 und s_2 von s, d. h. die Längen des linken und rechten Waagearmes L und R, und greift links die Last Q, rechts das Gewicht P an, so ist beim Gleichgewicht

$$QL = PR, \quad Q = P.R/L.$$

Es ist also $Q \gtreqless P$, je nachdem $R \gtreqless L$ ist.

Um aus dem gefundenen Gewicht P eines Körpers sein wahres Gewicht Q zu erhalten, muss man P mit R/L multipliciren.

Die Grösse des Balkenverhältnisses ermittelt man durch eine einmalige Wägung, indem man zwei genau gleiche Gewichtsstücke P auf die Schalen legt. Um die Waage einspielen zu machen, muss man dem am kürzeren Balkenarme (z. B. L) wirkenden Gewichte P noch ein Uebergewicht p hinzufügen, so dass

$$(P + p) L = PR.$$

Daraus folgt:

$$R/L = 1 + p/P.$$

Uebung. 1) Man macht den rechten Balkenarm R des Buff'schen Waagemodells (Fig. 27) etwas länger als den linken L. Die Waage hängt.

2) Durch Aufsetzen eines geeigneten Uebergewichtes (oder Schrot) links wird der Zeiger wieder auf Null zurückgebracht.

3) Zwei Zweihundert-Grammstücke werden auf beiden Seiten aufgelegt. Die Waage neigt sich nach rechts.

4) Links legt man so viel (p) Gramm auf, bis wieder Gleichgewicht hergestellt ist. Dann ist $R/L = 1 + p/200$.

5) Man misst die Längen von R und L, bildet R/L und überzeugt sich, dass sich aus der Wägung das Balkenverhältniss ergeben hat.

Beispiel: $p = 12$, also liegt: links (L) 212 gr, rechts (R) 200 gr. Da Gleichgewicht vorhanden ist, so ist: $212\,L = 200\,R$; $R/L = 1{,}060$. Messungen der Schneidenabstände ergeben: $R = 175$ mm, $L = 165$ mm, also $R/L = 1{,}061$, d. h. sehr nahe derselbe Werth wie eben.

3. Wägen mit einer nicht ganz gleicharmigen Waage.

α) **Uebung.** 1) Zunächst wird das Balkenverhältniss R/L ermittelt.

2) Dann bestimmt man das Gewicht P, das am rechten Waagebalkenarme dem Körper Q das Gleichgewicht hält.

Man multiplicirt P mit R/L, um das wahre Gewicht zu erhalten.

β) Den Einfluss des Balkenverhältnisses auf die Wägung umgeht man durch die Tarirmethode (Methode von Borda).

Uebung. 1) Der Körper Q wird auf eine Schale gelegt und durch Auflegen von Tara (Schrot etc.) auf der anderen Schale austarirt.

2) Man nimmt die Last Q fort und legt so viel Gewichte P auf, bis der Tara auf der anderen Seite wieder das Gleichgewicht gehalten wird.

Dann ist $Q = P$.

γ) Man benutzt die Methode der „Doppelwägung“. Entsprechen sich beim Gleichgewicht links Q, rechts P, und rechts Q, links P', so ist

$$1)\quad QL = PR, \qquad 2)\quad P'L = QR.$$

Hieraus folgt $Q = \sqrt{P \times P'}$; R/L fällt also heraus. Da sich P und P' nur um eine sehr kleine Grösse unterscheiden, so ist angenähert:

$$Q = \frac{1}{2}(P + P').$$

Durch Multiplication von 1 und 2 folgt $QP'L^2 = PQR^2$ und daraus

$$R/L = \sqrt{P'/P}.$$

Uebung. 1) Man wägt Q auf der linken Schale; Gewicht P;

2) bei der Wägung auf der rechten Schale ergebe sich das Gewicht P';

3) und berechnet $\sqrt{PP'}$ und $\frac{1}{2}(P + P')$.

Beispiel: Eine Kugel ergab nach der Tarirmethode $Q = 206$ gr. Als dieselbe links lag, entsprachen ihr rechts 193 gr (P). Da $R/L = 1{,}061$ ist, so ist $Q = 204{,}7$. Als die Kugel (Q) rechts lag, entsprachen ihr links 218 gr (P'). Also $Q = \sqrt{P \times P'} = 205{,}1$. $\frac{1}{2}(P + P') = 205{,}5$.

4. Chemische Waage.

Gebraucht wird: Chemische Waage (Fig. 28), eventuell Dosenlibelle; Gewichtssatz mit Pincette; Haarpinsel.

Die Bedingungen, welche erfüllt sein müssen, um mit einer Waage das Maximum der Empfindlichkeit zu erreichen und richtige Wägungen auszuführen, sind nach dem Obigen im Wesentlichen folgende:

1) Die beiden Arme des Waagebalkens, d. h. die Entfernungen zwischen der Schneide, auf der er selbst sich dreht, und den Schneiden, an denen die beiden Schalen hängen, müssen gleich sein.

2) Der Waagebalken muss eine möglichst grosse Länge haben, leicht sein und sich nicht durchbiegen.

Um bei relativ kleinem Gewicht des Waagebalkens denselben möglichst starr zu erhalten, construirt man denselben gitterartig.

Bei vielen neueren, besonders zu chemischen Zwecken dienenden Waagen hat man die Bedingung der grossen Länge nicht erfüllt. Je länger die Waagebalken, um so grösser ist die Schwingungsdauer, um so zeitraubender sind die Wägungen; dadurch, dass man den Waagebalken verkürzt, verringert man die Schwingungsdauer und ermöglicht eine schnellere Wägung.

3) Der Schwerpunkt des Waagebalkens etc. muss unterhalb und möglichst nahe der Drehungsaxe liegen.

4) Die Schneiden, welche die Schalen und den Waagebalken tragen, müssen in einer geraden Linie liegen und senkrecht auf der Richtung

des Waagebalkens stehen, sonst ist die Empfindlichkeit bei verschiedenen Belastungen verschieden, und man kann zur Bestimmung der Bruchtheile der kleinsten Gewichtsstücke nicht mehr die Methode (S. 52) anwenden.

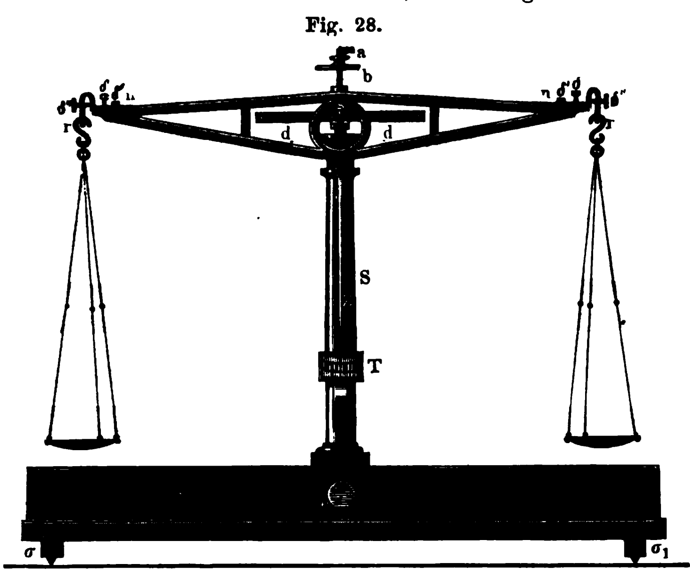
5) Die Schneiden müssen sich mit möglichst kleiner Reibung bewegen und möglichst scharf sein.

Der Einfluss der Bedingungen 1 bis 4 ist an den Waagemodellen discutirt worden.

Ist die Bedingung 5 nicht vollkommen erfüllt, so ist dies bei langarmigen Waagen von kleinerem Einfluss als bei kurzarmigen.

Apparat Fig. 28 stellt eine chemische Waage der gewöhnlichen Form dar. Das Fähnchen *a* dient dazu, den Waagebalken horizontal

Fig. 28.



zu stellen; *b* ist ein Laufgewicht, das zum Verändern der Lage des Schwerpunktes benutzt wird. Besondere Vorrichtungen am Ende des Waagebalkens ermöglichen die Länge desselben ein wenig zu ändern.

Durch Drehen an dem Knopf *e* wird eine auf einem Excentricum ruhende verticale Stange, mit der der horizontale Träger *dd* verbunden ist, gehoben; dadurch wird der Waagebalken in die Höhe gehoben, so dass die Schneide *s* nicht mehr auf ihrer Unterlage ruht, sondern frei schwebt und vor Abnutzung gesichert ist: die Waage wird arretirt. Bei vielen Waagen werden gleichzeitig die Schalen gehoben, so dass auch die sie tragenden Schneiden nicht mehr belastet sind. Hinter der Säule *S* hängt ein Senkel, der, wenn *S* genau vertical steht, gerade über einer Spitze einspielt. Ueber dem ganzen oberhalb des Brettes befindlichen Theile ist ein Kasten mit Glasfenstern und Thüren an-

gebracht, um Luftströmungen abzuhalten; zum Trockenerhalten der Luft steht in demselben eine Schale mit Chlorcalcium. Durch den oberen Theil der einen Seitenwand geht in einer Führung ein Stab mit Stiften, mittelst dessen man, ohne den Kasten zu öffnen, auf den Waagearm die Reiter aufsetzen und von ihm abheben kann.

Der Waagebalken ist zwischen der Schneide s und den Schneiden, welche die Waagschalen tragen, in zehn gleiche Theile getheilt. Setzt man auf den x ten derselben, von der Mitte aus gerechnet, ein reiterförmiges Gewicht (Fig. 29) von 1 cgr, so übt dasselbe das gleiche Drehungsmoment aus, wie ein Gewicht von $^1/_{10}$ x cgr = x mgr am Ende des Waagebalkens.

Fig. 29.

Uebung 1. Einstellung der Waage. 1) Man dreht an den Fussschrauben σ und σ_1, bis der Senkel einspielt, eventuell bis eine in die Waage gestellte Dosenlibelle einspielt.

2) Man schraubt das Gewicht b so weit herauf oder herunter, bis die Schwingungsdauer circa 10 bis 15 Secunden (bei den kurzarmigen Waagen 6 bis 10 Secunden) beträgt.

3) Durch Drehen an dem Fähnchen a wird der Zeiger auf den mittelsten Theilstrich der Theilung T eingestellt.

Uebung 2. Prüfung der Waage. a) Man prüft, ob die Waagebalken gleich lang sind und nicht etwa in ihrer Länge Ungleichheiten durch das verschiedene Gewicht der Waagschalen ausgeglichen sind. Man hängt die rechte Waagschale an den linken Waagebalken, die linke an den rechten. Bleibt das Gleichgewicht bestehen, so sind die Waagebalken gleich lang und die Waagschalen gleich schwer.

b) Man prüft, ob die Empfindlichkeit für verschiedene Belastungen die gleiche ist. 1) Man setzt auf den ersten Theilstrich des rechten Balkens den Reiter von 1 cgr, er wirkt hier wie 1 mgr; man beobachtet den Ausschlag α_1.

2) Man nimmt den Reiter herab, setzt auf beide Waagschalen Gewichte, die der maximalen Tragkraft entsprechen, bringt durch Zulegen von Gewichten auf der leichteren Seite den Zeiger zum Einspielen und setzt wieder den Reiter an dieselbe Stelle. Der Ausschlag α_2 soll derselbe wie vorher sein.

Ergeben sich bei den Prüfungen Fehler, so muss an den am Ende des Balkens angebrachten Vorrichtungen corrigirt werden, bei grossen Fehlern muss eventuell die Waage vom Mechaniker verbessert werden.

Bemerkung: Selbst wenn die Waagebalken von dem Verfertiger gleich lang gemacht worden sind, ändert sich das Verhältniss ihrer Längen, da es unmöglich ist, stets beide Waagebalken auf genau gleicher Temperatur zu halten; der eine steht etwa dem Ofen oder dem Fenster näher als der andere und bei sehr feinen Wägungen ist dieser Einfluss nicht zu vernachlässigen. (Bei Messing bedingt ein Temperaturunterschied von 1^0 eine Aenderung der Länge, damit auch des scheinbaren Gewichtes um $^2/_{10000}$, also bei einem Gramm Belastung schon um 0.2 mgr.)

Uebung 3. Ausführung einer Wägung.

Vorbemerkung: Die Gewichte müssen bei arretirter Waage aufgelegt und fortgenommen werden, da sonst die Schneiden leiden. Die Waagschalen dürfen nicht pendeln, man dämpft die Schwingungen eventuell mittelst eines Haarpinsels. Die Gewichte und die zu wägenden Gegenstände dürfen nie mit den Fingern angefasst werden, sondern nur mit der Pincette. Die Gewichte sind stets wieder in der richtigen Reihenfolge in den Gewichtssatz einzulegen. Man legt auf die linke Seite die Last, auf die rechte die Gewichte.

1. Bestimmung des Nullpunktes durch Schwingungsbeobachtungen.

Bei feinen Waagen wäre es zeitraubend, das Aufhören der Schwingungen abzuwarten und dadurch die Ruhelage zu bestimmen; man beobachtet die Umkehrpunkte einiger auf einander folgender Schwingungsbögen, wobei man die Bruchtheile der einzelnen Scalentheile schätzt, die Ruhelage des Zeigers entspricht in erster Annäherung dem Mittel aus zwei auf einander folgenden Umkehrpunkten.

Genauer bestimmt man die Ruhelage, wenn man das arithmetische Mittel aus einer ungeraden Anzahl von Schwingungsbögen nimmt. Dabei sind, je nach der Theilung auf *T* (Fig. 28), zu unterscheiden:

1) Der Mittelstrich ist mit 10 bezeichnet, dann addirt man alle Ablesungen auf der einen Seite, alle Ablesungen auf der anderen, bildet aus jeder Summe das Mittel und aus beiden Mitteln wieder das Mittel.

Beispiel:	Umkehrpunkte					Mittel	Nullpunkt
	1.	2.	3.	4.	5.		
	6,4		6,6		6,8	6,6	
		14,1		13,9		14,0	10,3 = $^1/_2$. 20,6

2) Der Mittelstrich ist mit 0 bezeichnet, dann rechnet man die Striche links negativ, die Striche rechts positiv und verfährt wie oben.

Beispiel:	Umkehrpunkte					Mittel	Nullpunkt
	1.	2.	3.	4.	5.		
	— 3,6		— 3,4		— 3,2	— 3,4	
		+ 4,1		+ 3,9		+ 4,0	+ 0,3 = $^1/_2$. 0,6

2. Das Wägen.

a) **Wägung bis auf die Centigramme.** 1) Man sucht, von den grössten Gewichten des Gewichtssatzes anfangend, das erste Gewichtsstück, welches leichter ist als der Körper.

2) Man legt, wieder von dem grössten der leichteren Gewichtsstücke anfangend, immer kleinere Gewichtsstücke auf, bis wiederum die beiden Gewichtsstücke vereint um weniges leichter sind, als der Körper u. s. f. Dies Verfahren ist viel weniger zeitraubend, als wenn man durch Probiren oder Zulegen von 1 gr nach dem anderen das Gleichgewicht herstellen wollte.

Beispiel: Das Gewicht des Körpers sei 17,38 gr, dann gestaltet sich der Gang der Wägung folgendermaassen: 10 gr zu wenig, 20 gr zu viel, zu 10 gr

noch 5 gr, 15 gr zu wenig, noch 2 gr zu wenig, noch 1 gr zu viel, 1 gr wird fortgenommen; 0,5 gr zu viel, 0,2 gr dazu zu wenig, noch 0,1 gr zu wenig, noch 0,1 gr zu viel, 0,1 gr fort, 0,05 gr zu wenig, noch 0,02 gr zu wenig, noch 0,01 gr; die Waage spielt ein: es ist also $P = 17,38$ gr.

b) Wägung bis auf die Milligramme und Bruchtheile derselben. Lässt sich durch Auflegen von Centigrammen kein Gleichgewicht herstellen, so benutzt man den 1 cgr-Reiter (Fig. 29). Man verschiebt ihn bei arretirter Waage und geschlossenem Waagekasten mittelst des dazu bestimmten Stabes, bis Gleichgewicht hergestellt ist.

Statt dass man so lange den Reiter verschiebt, bis das Gleichgewicht selbst vollkommen hergestellt ist, benutzt man auch den Satz, dass die Ausschläge proportional den Uebergewichten sind, indem man aus den Schwingungsbögen die jeweilige Ruhelage interpolirt (s. oben).

Beispiel:		Reiter:	Ruhelage:
Unbelastet . .	—	—	10,0 Scalenthle.
Gewichte . . .	302,53 gr	7 mgr	10,4 „
Gewichte . . .	302,53 gr	8 mgr	9,8 „

1 mgr entspricht also ein Ausschlag von 0,6 Scalentheilen. Die Ruhelage würde eintreten für eine Stellung des Reiters $7 + (10,4 - 10)/0,6 = 7,66$, oder das Gesammtgewicht beträgt: 302,53766 gr.

3. Reduction auf den leeren Raum.

Bei genauen Wägungen muss man den Auftrieb berücksichtigen, welchen die Körper in der Luft erfahren. Ist p das scheinbare Gewicht eines Körpers in der Luft, d. h. die Gewichtsstücke, die ihm in der Luft das Gleichgewicht halten, λ die Dichte der Luft ($\lambda = 0,0012$ bei circa 20^0), s die Dichte des Körpers, δ die Dichte der Gewichtsstücke, so ist das Gewicht im leeren Raume:

$$P = p\left(1 + \frac{\lambda}{s} - \frac{\lambda}{\delta}\right) = p + p\lambda\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{\delta}\right).$$

Zu dem gefundenen, scheinbaren Gewichte muss man also $p\lambda\,(1/s - 1/\delta)$ hinzufügen, um das wahre Gewicht zu finden; die Correction ist um so grösser, je mehr s und δ sich von einander unterscheiden.

4. Berücksichtigung der Ungleichheit der Waagebalken.

1) Man bestimmt (S. 47) das Verhältniss der Waagebalken R/L. Bei jeder Wägung, bei der die Last links, die Gewichte rechts liegen, multiplicirt man das aufgelegte Gewicht mit R/L.

2) Man benutzt die Tarirmethode (S. 47).

5. Calibriren eines Gewichtssatzes.

Die Gewichte eines Gewichtssatzes sind nach gewissen Regeln angeordnet. Meist enthält ein solcher ein bestimmtes Gesammtgewicht

z. B. von 100 gr, und die Einzelgewichte sind z. B. 50, 20, 10′, 10″, 5, 2, 1′, 1″, 1‴ gr, wo die Indices ′, ″, ‴ die einzelnen gleichwerthigen Gewichte bezeichnen. Statt des einen Grammstückes können mehrere kleinere Gewichte, 0,5, 0,2′, 0,1′, 0,1″, 0,1‴ gr u. s. f., gegeben sein. Durch das **Calibriren eines Gewichtssatzes** wird das Verhältniss der einzelnen Gewichtsstücke zu dem Gesammtgewicht aller Stücke, wie es durch directen Vergleich mit einem Normalgewicht erhalten ist, bestimmt.

1. Die Arme des Waagebalkens seien genau gleich lang. Dann stellt man auf die rechte und linke Schale die der Reihe nach folgenden Gewichtsstücke und bewirkt, falls die Waage nicht einspielt, dies durch Hinzufügen von kleinen Gewichtsstücken α, β, γ, δ, welche wir positiv oder negativ setzen, je nachdem sie auf die eine oder andere Schale gestellt werden.

Schema:

$$\begin{aligned} 50' &= 20 + 10' + 10'' + 5 + 2 + 1' + 1'' + 1''' + \alpha \\ 20 &= 10' + 10'' + \beta \\ 10'' &= 10' + \gamma \\ 5 + 2 + 1' + 1'' + 1''' &= 10' + \delta \end{aligned}$$

Die Summe S aller Gewichte $S = 50' + 20' + 10' + 10'' \ldots$ sei gleich $100 + \varrho$ statt genau 100, wo ϱ durch Vergleichung mit einem Normalgewichte gefunden wird.

Drückt man alle Gewichte zunächst durch 10′ aus, so wird:

$$\begin{aligned} 50' &= 5 \,.\, 10' + \alpha + \beta + 2\gamma + \delta \\ 20 &= 2 \,.\, 10' + \beta + \gamma \\ 10'' &= 1 \,.\, 10' + \gamma \\ 5 + 2 + 1' + 1'' + 1''' &= 1 \,.\, 10' + \delta \end{aligned}$$

oder:

$$S = 10 \,.\, 10' + \alpha + 2\beta + 4\gamma + 2\delta = 100 + \varrho.$$

Setzt man:

$$\tfrac{1}{10}(\alpha + 2\beta + 4\gamma + 2\delta - \varrho) = \sigma,$$

so ist:

$$\begin{aligned} 50' &= 50 - 5\sigma + \alpha + \beta + 2\gamma + \delta \\ 20' &= 20 - 2\sigma + \beta + \gamma \\ 10'' &= 10 - \sigma + \gamma \\ 10' &= 10 - \sigma \\ 5 + 2 + 1' + 1'' + 1''' &= 10 - \sigma + \delta \end{aligned}$$

Nimmt man die Summe aller Gewichtsstücke des Satzes als richtig an, so wird in den obigen Formeln $\varrho = 0$. Dies kann meist geschehen, wenn es sich nur um relative Gewichtsbestimmungen handelt, wie bei chemischen Analysen u. s. f.

2. Sind die Arme der Waage nicht gleich lang, so werden die gegen einander abzuwägenden Gewichtsstücke mittelst der Methode von Borda oder der Doppelwägung mit einander verglichen (s. oben).

VI. Dichte der festen und flüssigen Körper.

Einleitung.

Gebraucht wird: Kleiner Würfel aus Eisen; Parallelepiped aus Messing; Kugel aus Kupfer; Cylinder aus Messing.

Capillarröhren, Wulff'sche Flasche, Gummischläuche, Alkohol, Aether, Chlorcalciumrohr, Brenner mit Schlauch; Kugelröhre (Fig. 30), Abdampfschale, Quecksilber (event. grosse Abdampfschale mit Dreifuss, Drahtnetz, Brenner zum Trocknen), Millimeterscala (event. auf Spiegelglas), Lupe. — Uhrglas, eine Waage mit Gewichten, Thermometer.

Waage mit Gewichtssatz; Eisencylinder; gewöhnliche Waage; Tafelwaage.

Hydrostatische Waage (Fig. 33); Gewichtssatz; Apparat von Al Birûni (Fig. 34) mit Uhrgläschen; Spritzflasche; Kästchen mit Nickel-, Schwefel- und Antimonstücken; Pyknometer; Terpentinöl; Sprengel'sches Pyknometer (Fig. 37) mit Kugelrohr und Schlauch (Fig. 38); Ostwald'sches Pyknometer mit Kochsalzlösung; Wasserbad; Bleistücke; Zinkstücke für das Pyknometer.

Apparat für das Archimedische Princip (Fig. 39); grössere Stücke von Bleiglanz, Zinkblende und Zinn an einem etwa millimeterdicken Messingdraht; Bänkchen, Becherglas und Spritzflasche; Stücke von Magnesium, Kupfer und Aluminium an sehr dünnen, weichen Messingdrähten; Glaseimer an dünnen Messingdrähten mit Glasspatel; Becherglas; Vaselin; Brenner; Flachzange; gepulvertes Glas; Glasstück an dünnem Messingdraht.

Jolly's Federwaage mit Glasgefäss; Kästchen mit Glasstücken; Gewichtssatz.

Westphal-Mohr'sche Senkwaage mit Reitern; Senkkörper und Glasgefäss, Alkohol. Schwimmkörper (Fig. 45) mit Ausflussgefäss und Becherglas.

Nicholson'sche Senkwaage mit Glasgefäss und Messingbügel; Messingklötzchen; gewöhnlicher Gewichtssatz.

Aräometer für Flüssigkeiten, leichter und schwerer als Wasser; Standgefässe dazu. Absoluter Alkohol (Salzlösung).

Die Dichte[1]) einer Substanz ist die Masse (Quantität, Materie) der mit der Substanz erfüllten Volumeneinheit.

Das specifische Gewicht[2]) ist das Gewicht der mit der Substanz erfüllten Volumeneinheit.

Die Zahlenwerthe für die Dichte und für das specifische Gewicht sind einander gleich, da in dem metrischen Maass- und Gewichtssystem die Masseneinheit die Masse von 1 cbcm Wasser ist und gleichzeitig

---

[1]) Man nennt dieselbe auch manchmal die specifische Masse.

[2]) Man findet auch oft die Definition: Das specifische Gewicht ist die Zahl, die angiebt, wie viel mal das Gewicht eines Volumens einer Substanz grösser ist als das Gewicht des gleichen Volumens Wasser.

das Gewicht dieser Masse als Gewichtseinheit dient (s. S. 5). Daher verwechselt man häufig beide Bezeichnungen; man spricht oft von Dichte, wo zunächst nur das specifische Gewicht ermittelt wird. In vielen Fällen, so bei den Dämpfen, spricht man fast nur von der Dampfdichte, selten vom specifischen Gewichte der Dämpfe.

Die Dichte ist aber streng genommen eine Masse, das specifische Gewicht eine Kraft.

Da das Volumen, welches von derselben Quantität Substanz eingenommen wird, sich mit der Temperatur verändert, so ist die Dichte mit der Temperatur veränderlich, und es ist stets anzugeben, für welche Temperatur der mitgetheilte Werth der Dichte gilt. (Bei Flüssigkeiten ist dies gewöhnlich 15 oder 18°.) Bei festen und flüssigen Körpern ist die Aenderung des Volumens bei mässigen Temperaturänderungen relativ klein, bei Gasen gross; daher braucht bei ersteren, wenn es nur auf Näherungswerthe ankommt, die Dichte nur für die mittlere Temperatur der Umgebung angegeben zu werden.

I. Das specifische Gewicht einer Substanz ermittelt man, indem man das Gewicht eines bekannten Volumens derselben bestimmt. Hat ein homogener Körper das Volumen von V Cubikcentimetern, und ist sein Gewicht P Gramm, so ist das Gewicht von 1 cbcm derselben Substanz, also das specifische Gewicht (bezw. die Dichte):

$$s = P/V \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Uebung. 1) Die Dimensionen regelmässig gestalteter Körper (Parallelepipede, Kugeln und Cylinder) aus verschiedenen Metallen werden mit Hülfe der in Cap. I besprochenen Instrumente gemessen. Ihre daraus in Cubikcentimetern berechneten Volumina seien V.

2) Die Körper werden gewogen; die Gewichte seien P.

Die Dichten werden nach der Formel 1) berechnet.

Der Inhalt eines Parallelepipedes ist: $V = abc$ cbcm, wenn a, b, c die Längen der Kanten in Centimetern sind; der einer Kugel ist: $V = {}^4/_3 \pi r^3$ ($\pi = 3,1416$), wenn r der Halbmesser in Centimetern ist; der eines (Kreis-) Cylinders ist: $V = \pi r^2 h$, wenn r der halbe Durchmesser, h die Höhe des Cylinders ist.

Beispiele: Würfel aus Eisen: $a = b = c = 1,40$ cm; $V = 1,4^3 = 2,744$ cbcm; $P = 21,129$ gr, also $S = 7,7$. — Parallelepiped aus Messing: $a = 0,5$ cm, $b = 1$ cm, $c = 2$ cm, $V = 0,5 \times 1 \times 2 = 1$ cbcm, $P = 8,4$ gr, $S = 8,4$. — Kugel aus Kupfer: Durchmesser $= 1,50$ cm, $r = 0,75$ cm, $V = 1,767$ cbcm, $P = 15,727$ gr, $S = 8,9$. — Cylinder aus Messing: Durchmesser $= 1,20$ cm, $r = 0,6$ cm, $h = 2,3$ cm, $V = 3,1416 \times 0,36 \times 2,3 = 2,604$ cbcm; $P = 21,353$ gr, $S = 8,2$, also kleiner als für das parallelepipedische Stück. Messing ist eine Legirung aus Kupfer und Zink; je nach der relativen Menge der beiden Bestandtheile liegt seine Dichte zwischen 7,7 und 8,7.

II. Aus der Gleichung 1) folgt

$$V = P/d \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Diese Gleichung kann man zur Volumenbestimmung benutzen.

Füllt man einen Raum mit einem Körper von bekannter Dichte d, z. B. Wasser oder Quecksilber, so erhält man das Volumen, wenn man die in dem Raume enthaltene Gewichtsmenge P durch die Dichte d dividirt. Hierauf beruht das Calibriren von Hohlmaassen, Kolben, Röhren etc.

Für Wasser und Quecksilber giebt die Tabelle am Schlusse des Buches die Dichten für verschiedene Temperaturen.

a) Calibriren eines Capillarrohres.

Uebung. 1) Man reinigt und trocknet die Röhre (vgl. S. 96).

2) Nachdem man den Mund von Speichel befreit hat, saugt man durch einen an die Capillarröhre angesetzten Gummischlauch, der mit einer Kugel verbunden ist, aus einem Schälchen, Fig. 30, einen Faden von trocknem reinem Quecksilber von circa 10 cm Länge in das Capillarrohr, während man dasselbe möglichst horizontal hält.

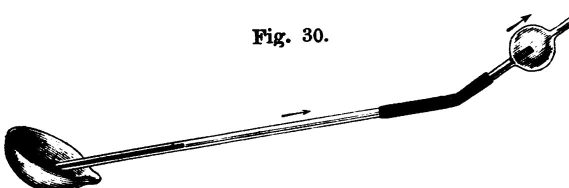
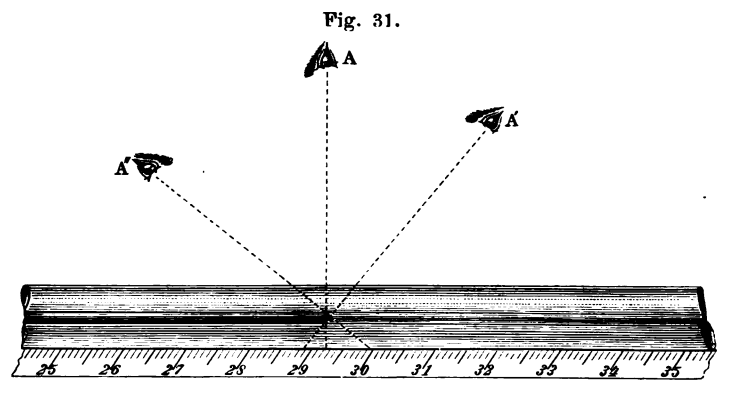


Fig. 30.

3) Man schliesst das Rohr unten mit dem Finger, hebt das untere Ende aus dem Quecksilber und legt das Rohr auf eine Millimeter-theilung. Der Faden darf an keiner Stelle Luftblasen enthalten. Bei Thermometerröhren benutzt man die Scala des Thermometers selbst zur Ausmessung der Fadenlänge. Wir setzen die Scala als richtig getheilt voraus.

Fig. 31.



4) Die Stellungen der beiden Enden des Fadens (A_1 und A_2) werden, eventuell mit der Lupe, abgelesen.

Bei allen Messungen, bei denen der Gegenstand (z. B. Quecksilberfaden oder Zeiger), dessen Lage gegen eine Scala abgelesen werden

soll, nicht mit der Theilung in einer Ebene liegt, muss die Verbindungslinie vom Auge und dem Ende des Quecksilberfadens beim Ablesen genau senkrecht zur Theilung stehen, wie in A, Fig. 31. Blickt man schräg gegen die Theilung, wie bei der Stellung A' oder A'' in Fig. 31, so erhält man fehlerhafte Ablesungen, bei der Lage A' projicirt sich das Ende des Fadens auf 288,9, bei der Lage A'' auf 299,5; man nennt die durch eine falsche Augenstellung bewirkten Ablesungsfehler: Parallaxenfehler.

Man erkennt die richtige Stellung des Auges im vorliegenden Falle und ebenso bei den Thermometerablesungen daran, dass die Theilstriche, welche bei der Ablesung in Betracht kommen, gerade erscheinen, während die nach rechts und links gelegenen so gekrümmt sind, dass sie ihre concave Seite nach dem betrachteten Theilstriche hinkehren.

Noch besser legt man die Röhre auf eine Scala, die auf einem Streifen Spiegelglas getheilt ist, und hält das Auge so, dass das Spiegelbild des Endes des Quecksilberfadens sich mit dem Spiegelbilde des Auges deckt.

5) Man wiederholt die Ablesungen A_1 und A_2 an verschiedenen Stellen der Röhre, indem man durch geringes Neigen den Quecksilberfaden in der Röhre fortschiebt.

Ist die Länge des Fadens $L = A_1 - A_2$ cm an allen Stellen gleich, so ist die Röhre cylindrisch; sonst giebt die verschiedene Länge des Fadens ein Mittel, um den Grad der Ungleichförmigkeit des Querschnittes zu erkennen. Zeigt eine Röhre Caliberfehler, so stellt man nach den beim Thermometer angegebenen Methoden eine Correctionstabelle her, nachdem man die Lage zweier Punkte am Ende der Röhre, beim Thermometer der Fundamentalpunkte, festgelegt hat.

b) Bestimmung des Querschnittes einer Capillarröhre.

Man erhält den Querschnitt aus dem Gewichte P eines Quecksilberfadens von bestimmter Länge L, indem man dessen Volumen V aus dem specifischen Gewichte des Quecksilbers berechnet.

Uebung. 1) Man reinigt und trocknet das Capillarrohr wie unter a und bestimmt die mittlere Länge L eines Quecksilberfadens in Centimetern.

2) Man lässt das Quecksilber in ein Uhrglas fliessen und wägt das Ganze: Gewicht P_1.

3) Man giesst das Quecksilber ab und wägt das Uhrglas: Gewicht P_2.

4) Man liest die Zimmertemperatur t^0 ab.

Berechnung: Das Gewicht des Quecksilbers ist $P = (P_1 - P_2)$ gr, das Volumen desselben (vergl. S. 55) $V = P/d$, wo d die Dichte des Quecksilbers bei t^0 ist (Tabelle 6 am Schlusse). Ist q der Querschnitt der cylindrischen Röhre, so ist das Volumen eines L cm langen Stückes $V = L.q$, woraus sich für den Querschnitt ergiebt: $q = V/L = P/dL$ qcm.

Ist der Querschnitt kreisförmig, so ist $q = \pi . r^2$, wo r der Radius der Röhre ist; also ist:

$$r = \sqrt{V/\pi L} = \sqrt{P/\pi L d}.$$

Beispiel: $L_1 = 13{,}75$ cm am einen Ende der Capillare; $L_2 = 13{,}78$ cm am anderen Ende; die Röhre ist also nicht ganz genau calibrisch; Mittel: $L = 13{,}765$ cm, $P = 0{,}589$ gr, $t = 15^0$, $d = 13{,}6$, $V = 0{,}589/13{,}6 = 0{,}0433$ cbcm, $r = 0{,}0316$ cm.

III. Da s das Gewicht der Volumeneinheit ist, so ist das Gewicht P eines Volumens V irgend einer Substanz vom specifischen Gewichte S:

$$P = V . s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Nach dieser Gleichung berechnet man aus dem Volumen V einer Substanz bei bekanntem specifischen Gewichte s das Gewicht P des betreffenden Quantums, so z. B. das Gewicht eines Berges, dessen Gestalt und Substanz bekannt ist.

Uebung. 1) Man misst die Dimensionen eines regelmässig gestalteten Körpers und berechnet daraus das Volumen (s. Formeln auf S. 55). Das specifische Gewicht der Substanz sei s, dann ist das Gewicht $V . s$.

2) Man wägt das Stück auf einer gewöhnlichen Waage.

Beispiel: Gewicht eines Kreiscylinders aus Eisen. Durchmesser $\delta = 4{,}1$ cm. Höhe $l = 8{,}2$ cm. Also $V = 108{,}3$ cbcm; $S = 7{,}7$ (S. 55); $P = 108{,}3 \times 7{,}7 = 833$ gr. Die Wägung auf einer Tafelwaage ergab $P = 840$ gr.

IV. Aus der Dichte d leiten sich folgende Grössen ab:

1. Das specifische Volumen v_s ist das Volumen der Gewichts- (Massen-) einheit in Cubikcentimetern:

$$v_s = 1/d \,.\, \text{cbcm}.$$

2. Das Atomvolumen V_{At} ist das Volumen in Cubikcentimetern, welches das in Grammen ausgedrückte Atomgewicht A (vgl. S. 6) eines Körpers einnimmt:

$$V_{At} = v_s A = A/d \text{ cbcm}.$$

3. Das Molecularvolumen V_{Mol} ist das Volumen, welches das in Grammen ausgedrückte Moleculargewicht eines Körpers einnimmt:

$$V_{Mol} = v_s M = M/d \text{ cbcm}.$$

Bemerkung: Bei jeder Bestimmung einer Dichte ist von dem Praktikanten das Atom- resp. Molecularvolumen zu berechnen, da diese Zahlen zur Begründung der am Schlusse dieses Abschnittes aufgeführten allgemeinen Gesetze dienen. Die in den Beispielen behandelten Körper sind so ausgewählt, dass diese Gesetze an ihnen hervortreten.

Beispiel: Für die Dichte des Eisens (Fe = 56) wurde 7,7 gefunden, also ist das specifische Volumen 1/7,7 und das Atomvolumen $V_{At} = 56/7{,}7 = 7{,}3$.

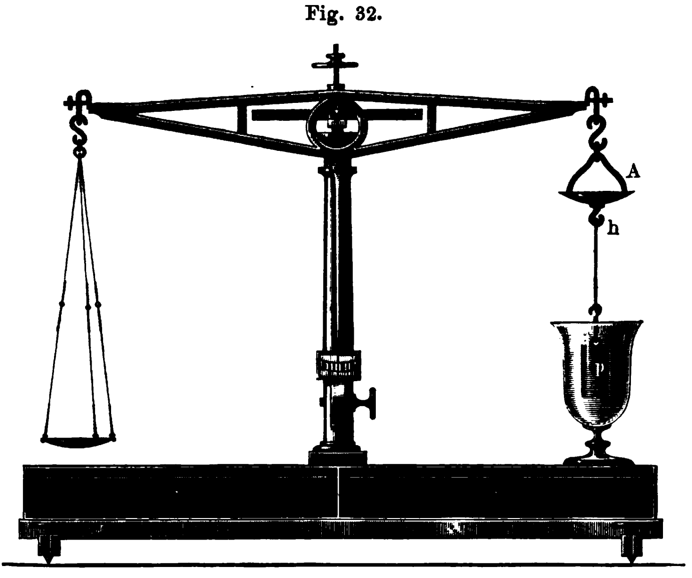
Die Dichte ist $d = P/V$. Das Gewicht P bestimmt sich aus Wägungen, das Volumen V nach verschiedenen, theils directen, theils indirecten Methoden.

Zu den Wägungen dienen im Allgemeinen die gewöhnlichen Waagen oder eine besondere Form derselben, die hydrostatische Waage [1]).

Bei letzterer ist an Stelle der einen Waagschale eine andere A (Fig. 32) mit viel kürzerem Bügel angebracht, die an ihrem unteren Theile noch einen Haken h trägt, um an demselben Gegenstände, wie den Körper p, aufzuhängen.

Das Volumen V bestimmt man entweder direct durch Ausmessen etc., oder indem man, besonders bei festen Körpern, das von ihnen verdrängte Volumen einer Flüssigkeit bestimmt. Das erste Verfahren ist oben benutzt

Fig. 32.



worden; da indess die Körper nie absolut regelmässige Gestalt besitzen, so ist man in der Praxis auf das zweite angewiesen; dabei bestimmt man entweder das Volumen der verdrängten Flüssigkeit aus dem Gewichte, oder man bedient sich hydrostatischer Methoden.

---

[1]) Um bei feineren Waagen die Waagschalen nicht durch den kürzeren Bügel ersetzen zu müssen, sind an dem oberen Ende der auch gewöhnlich verwendeten Waagschal-Bügel Haken angebracht, an welche die Körper gehängt werden; die bei der hydrostatischen Methode zu benutzenden Gläser werden dann auf kleine Bänkchen gestellt, welche über die Waagschalen gesetzt werden, diesen aber freien Spielraum lassen.

1. Verdrängungsmethoden.

I. Bestimmungen mit dem Apparate von Al Birûni.

Ein kolbenförmiges Glasgefäss mit cylindrischem Halse A, an den ein engeres, umgebogenes Glasrohr B angesetzt ist, und vor dem ein Gefäss, etwa ein Uhrglas, C steht (Fig. 33), wird so weit mit Wasser gefüllt, bis dasselbe aus dem engen Rohre B ausfliesst.

1) Man wägt das leere Uhrglas, sein Gewicht sei in Grammen . . . . p.
2) Man wägt den Körper, sein Gewicht sei . . . . P.
3) Man wirft den Körper in das Al Birûni'sche Gefäss und fängt das ausfliessende Wasser im Uhrglase auf.
4) Man wägt Uhrglas und Flüssigkeit, ihr Gewicht sei π.

Das Gewicht des Wassers in Grammen und sein Volumen in Cubikcentimetern ist . . . . $\pi - p$.

Die Dichte des Körpers ist . . . . $d = \frac{P}{\pi - p}$.

Beispiel: $p = 2{,}72$ gr; $P = 12{,}32$ gr Nickelstücke (Ni = 59) werden in den Apparat geworfen; $\pi = 4{,}21$ gr; also $V = \pi - p = 1{,}49$ cbcm, $d = 8{,}3$. $V_{At} = 59/8{,}3 = 7{,}1$. Für Schwefel (S = 32) ist $d = 2{,}0$, also $V_{At} = 16$; für Antimon (Sb = 120) ist $d = 6{,}7$, also $V_{At} = 18$.

II. Bestimmungen mit dem Pyknometer.

Apparat. Das Pyknometer ist ein Glasfläschchen von bestimmtem Rauminhalte. Die einfachste Form (Fig. 34) desselben ist ein Fläschchen A, mit einem durchbohrten, eingeschliffenen Glasstöpsel B,

Fig. 33.

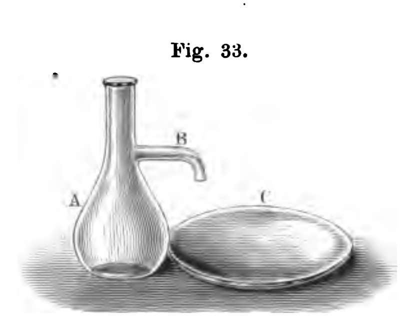
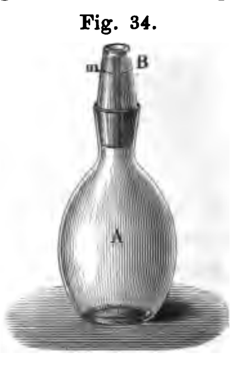


Fig. 34.



an dem eine Marke m angebracht ist. Man füllt A mit irgend einer Flüssigkeit bis zum Rande, so dass sie als Kuppe übersteht, setzt den Stöpsel auf, so dass die Flüssigkeit ausspritzt, und tupft bis zur Marke m mit Filtrirpapier ab; dann enthält die Flasche bis zur Marke m bei gleicher Temperatur stets dasselbe Volumen. Vor dem

Wägen trocknet man das Fläschchen aussen, ohne es zu erwärmen und zu drücken, mit einem Tuche ab.

Das Volumen, welches vom Glasbläser auf dem Pyknometer angeschrieben ist, ist vielfach nur angenähert richtig, darf daher **n i e** den Rechnungen ohne vorherige Controle zu Grunde gelegt werden.

Vollkommener ist das Pyknometer Fig. 35. In ein Fläschchen ist ein Thermometer eingeschliffen. *c* ist ein sich oben etwas erweiterndes, enges Rohr, das nahe seinem oberen Ende eine Marke *m* trägt und das durch einen kleinen eingeschliffenen Stöpsel verschlossen ist.

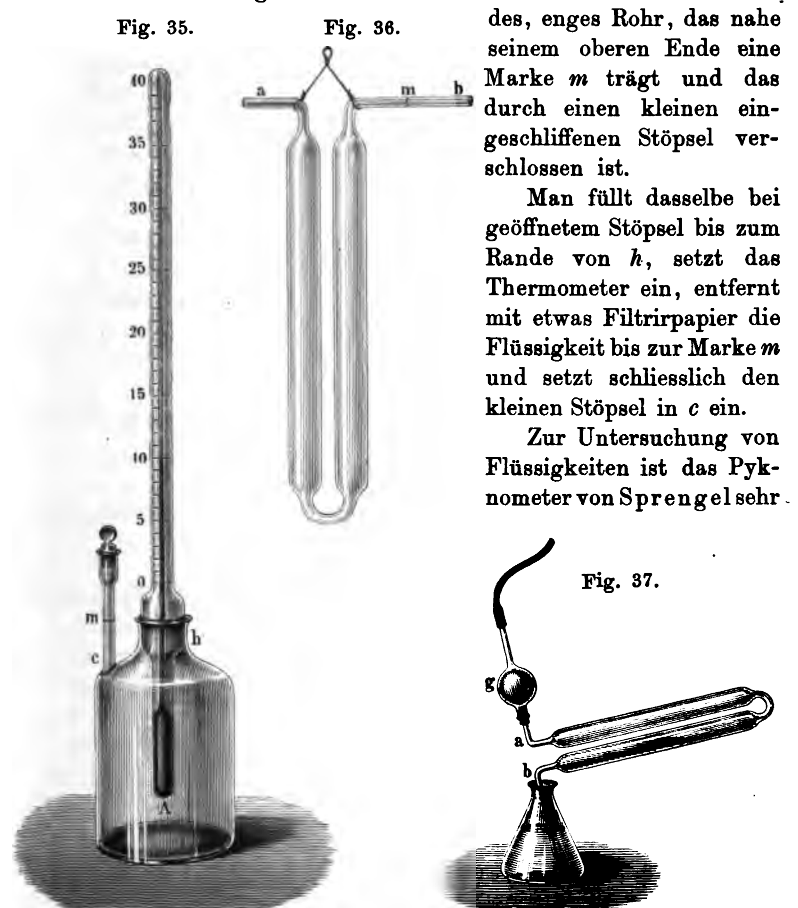


Fig. 35. Fig. 36. Fig. 37.

Man füllt dasselbe bei geöffnetem Stöpsel bis zum Rande von *h*, setzt das Thermometer ein, entfernt mit etwas Filtrirpapier die Flüssigkeit bis zur Marke *m* und setzt schliesslich den kleinen Stöpsel in *c* ein.

Zur Untersuchung von Flüssigkeiten ist das Pyknometer von **S p r e n g e l** sehr geeignet (Fig. 36). Eine U-Röhre ist an beiden Enden ausgezogen, die engen Theile sind horizontal umgebogen. Der eine horizontale Theil *a* ist kürzer und enger als der andere *b*. Nahe an der Biegung trägt *b* eine Marke *m*. Man füllt den Apparat, indem man *b* in die Flüssigkeit eintaucht und bei *a* dieselbe unter Einschaltung eines Kugelrohres durch einen Kautschukschlauch ansaugt (Fig. 37). Hierauf taucht man das Pyknometer in ein Wasserbad. Bei *b* tupft man die

Flüssigkeit so lange mit Filtrirpapier ab, bis sie bis zur Marke m reicht. Ist zu viel Flüssigkeit fortgenommen, so nähert man a einen Glasstab, an dem ein Tropfen der Flüssigkeit hängt. Zweckmässig nimmt man das Bad etwas wärmer als die umgebende Luft; dann zieht sich nach dem Herausnehmen aus dem Bade die Flüssigkeit in das Pyknometer zurück, während sie im entgegengesetzten Falle leicht ausfliesst.

Bei dem Pyknometer von Ostwald ist der eine Schenkel des U-Rohres capillar.

Uebungen. 1. Flüssigkeiten.

a) Pyknometer (Fig. 35).

1) Man wägt das Pyknometer leer, Gewicht . . . . . . P_p.
2) Man wägt das Pyknometer mit Wasser, Gewicht . . . P_W.
2[a]) Man misst die Temperatur des Wassers . . . . t_1.
3) Man spült das Pyknometer mit Alkohol und Aether aus, erwärmt und trocknet mittelst eines Luftstromes.
4) Man füllt das Pyknometer mit der Flüssigkeit, Gewicht P_f.
4[a]) Man misst die Temperatur der Flüssigkeit . . . . . t_2

Das Gewicht des Wassers ist $p_1 = P_W - P_p$.

Das Gewicht der Flüssigkeit ist $P = P_f - P_p$.

Die Dichte der Flüssigkeit ist in erster Annäherung, wenn wir den Einfluss der Temperatur vernachlässigen,

$$d = P/p_1.$$

Beispiel: $P_p = 6{,}82$; $P_w = 16{,}75$; $V = P_w - P_p = 9{,}93$ cbcm; Pyknometer mit Terpentinöl gefüllt: $P_f = 15{,}54$; also $P = P_f - P_p = 8{,}72$; $d = 0{,}88$. Terpentinöl, $C_{10}H_{16} = 136$; also $V_{Mol} = 136/0{,}88 = 155$.

Bemerkung: Bei genauen Messungen muss man die Temperatur t_1 und t_2 bei den Wägungen 2 und 4 berücksichtigen.

1) Berücksichtigt man nur die Ausdehnung des Wassers und vernachlässigt die des Glases und ist p_1 das Gewicht des Wassers im Pyknometer bei t^0_1, δ_1 und δ_2 die Dichten des Wassers bei t_1 und t_2, so ist das bei t^0_2 in dem Pyknometer enthaltene Gewicht Wasser:

$$w'_2 = p_1 \cdot \delta_2/\delta_1.$$

Berücksichtigen wir auch die Ausdehnung des Gefässes, dessen Material den cubischen Ausdehnungscoëfficienten 3β hat, so ist

$$w''_2 = p_1 \, [1 + 3\beta \, (t_2 - t_1)] \, \delta_2/\delta_1.$$

Die Dichten der Substanz werden:

$$d' = \delta_1 \cdot P/p_1 \text{ und } d'' = [1 + 3\beta \, (t_2 - t_1)] \, \delta_1 \cdot P/p_1.$$

Berücksichtigt man noch den Gewichtsverlust in der Luft, deren Dichte man $\lambda = 0{,}0012$ setzen kann, so ist die dafür corrigirte und auf Wasser von 4^0 bezogene Dichte:

$$d''' = \frac{P}{w''_2} \{\delta_2 - \lambda\} + \lambda.$$

b) Sprengel'sches Pyknometer (Fig. 37 und 38).

Die Reihenfolge der Wägungen zur Bestimmung der Dichte und die Berechnung ist dieselbe wie oben.

Beispiel: Bei einer normalen Kochsalzlösung (58,5 gr NaCl im Liter) wurde gefunden: $P_p = 16{,}620$ gr; $P_w = 43{,}100$; $V = P_w - P_p = 26{,}480$ cbcm; $P_f = 44{,}170$; $P = P_f - P_p = 27{,}550$ gr; $d = 27{,}550/26{,}480 = 1{,}040$.

2. Feste Körper.

a) In Wasser unlösliche Körper.

1) Man wägt das Pyknometer (Fig. 35) voll Wasser, Gewicht P_w.
   Man bestimmt die Temperatur . . . . t_1.
2) Man wägt von dem Körper so viel, dass ein möglichst grosser Theil des Pyknometers erfüllt wird, Gewicht . P.
3) Man wirft den Körper in das Pyknometer, schüttelt, um die am Körper haftenden Luftbläschen zu entfernen, füllt das Pyknometer bis oben und wägt wieder, Gewicht . . P_1.
   Man bestimmt die Temperatur . . . . t_2.

Das Gewicht des verdrängten Wassers ist $w = P_w + P - P_1$ gr, das Volumen des Körpers ist also $P_w + P - P_1$ cbcm.

Die Dichte ist demnach:

$$d = \frac{P}{P_w + P - P_1} = \frac{P}{w}.$$

Bemerkung: Berücksichtigt man die Ausdehnung des Wassers und des Pyknometers, was im vorliegenden Falle wesentlich ist, so ist das scheinbare Gewicht des dem Körper gleichen Volumens Wasser, wenn δ_1 und δ_2, die Dichte des Wassers bei t_1 und t_2 ist:

$$w'' = P + (P_w - P_1) + (P_w - \pi)\,[1 + 3\,\beta\,(t_2 - t_1)]\,\delta_2/\delta_1.$$

Berücksichtigt man auch den Gewichtsverlust in der Luft, so erhält man:

$$d''' = \frac{P}{w''}\,(\delta_2 - \lambda) + \lambda,$$

wo $\lambda = 0{,}0012$ ist.

Beispiel: Blei (Pb = 206): $P_w = 16{,}77$; $P = 29{,}27$; $P_1 = 43{,}48$ gr; $P_w + P - P_1 = 2{,}56 = V$; $d = 29{,}27/2{,}56 = 11{,}4$; $V_{At} = 206/11{,}4 = 18$. Zink (Zn = 65): $d = 7{,}2$; $V_{At} = 9{,}0$.

b) In Wasser lösliche Körper:

1) Man wägt das Pyknometer mit einer Flüssigkeit von der Dichte d_1, in der der Körper sich nicht löst, Gewicht . . P_f.
2) Man wägt den Körper, Gewicht . . . . P.
3) Man wirft den Körper in das Pyknometer, füllt das Pyknometer bis oben und wägt wieder, Gewicht . . . . . P_1.

Das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit ist $P_f + P - P_1$, das Volumen derselben, also auch das des eingebrachten Körpers, ist nach Formel 2, S. 55: $(P_f + P - P_1)/d_1$, also ist die Dichte des Körpers:

$$d = \frac{P . d_1}{P_f + P - P_1}.$$

Beispiel: Chromalaun [$CrK(SO_4)_2 + 12\,H_2O = 499$]. Flüssigkeit: Terpentinöl $d_1 = 0,88$; $P_f = 15,960$; $P = 2,295$; $P_1 = 17,130$. $P_f + P - P_1 = 1,125$; $d = 1,8$; $V_{Mol} = 277$.

2. Hydrostatische Methoden.

Archimedisches Princip: Ein Körper verliert in einer Flüssigkeit so viel an Gewicht, als das von ihm verdrängte Volumen der Flüssigkeit wiegt. Diesen Gewichtsverlust nennt man Auftrieb.

Zur Erläuterung des Archimedischen Princips dient der Apparat Fig. 38. Derselbe besteht aus dem massiven Messingcylinder p, der genau in die (in der Figur aufgeschnitten gezeichnete) Hülse c hineinpasst.

Fig. 38.



Uebung. 1) Man hängt den Apparat (Fig. 38) an der kürzeren Waagschale der hydrostatischen Waage (Fig. 32) auf, und tarirt ihn.

2) Man hängt an einem feinen Drahte den inneren Theil p an dem Haken x in Wasser: die rechte Seite des Waagebalkens steigt, wird also leichter.

3) Man giesst in den Hohlraum von c Wasser. Sowie derselbe ganz erfüllt ist, ist das Gleichgewicht wieder hergestellt; der Gewichtsverlust ist also gleich dem Gewichte des das Innere von c erfüllenden Wassers, also gleich dem Gewichte des von dem Cylinder p verdrängten Wasservolumens.

Princip: Ist das Gewicht eines Körpers in der Luft P gr, und in Wasser von 4^0 P_w gr, so wiegt das von ihm verdrängte Volumen Wasser $(P - P_w)$ gr; also ist das verdrängte Volumen V, das demjenigen des Körpers gleich ist: $V = (P - P_w)$ cbcm. Die Dichte ist also:

$$d = \frac{P}{V} = \frac{P}{P - P_w}.$$

Bestimmen wir nicht den Gewichtsverlust in Wasser, sondern in einer Flüssigkeit von der Dichte d_1, und ist das Gewicht des Körpers in der letzteren P_f, so ist das Gewicht des verdrängten Volumens dieser Flüssigkeit $(P - P_f)$; 1 cbcm derselben wiegt aber d_1 gr, also ist das vom Körper verdrängte Volumen, welches dem des Körpers gleich ist: $(P - P_f)/d_1$, und es wird die Dichte des Körpers:

$$d = \frac{P \cdot d_1}{P - P_f}.$$

Zur Bestimmung der Gewichte der zu untersuchenden Körper und des Gewichtsverlustes derselben bedient man sich entweder der gewöhnlichen Waage oder aber besonderer Vorrichtungen.

I. Bestimmungen mit der gewöhnlichen Waage.

1. Feste Körper.

a) Feste Körper, die schwerer als Wasser und in Wasser unlöslich sind:

1) Man wägt den Körper für sich; Gewicht . . . . . . P.
2) Man hängt ihn an einem dünnen Drahte, an dem Ende A (Fig. 32) des Waagebalkens, unter Wasser auf, und wägt ihn; Gewicht von Draht und Körper . . . . P_w.
3) Man entfernt den Körper, wägt den Draht, während er ebenso weit in die Flüssigkeit eintaucht, wie vorher; Gewicht in der Flüssigkeit . . . . P_2.

Dann ist die Dichte:

$$d = \frac{P}{P - (P_w - P_2)}.$$

Denn $P_w - P_2$ ist das Gewicht des Körpers im Wasser, sein Gewichtsverlust also $P - (P_w - P_2)$.

Ist das Gewicht des Drahtes in der Flüssigkeit P_2 sehr klein[1]), so kann man $P_2 = 0$ setzen und es wird:

$$d = \frac{P}{(P - P_w)}.$$

Beispiel: Bleiglanz ($PbS = 238$) an einem etwa 1 mm dicken Messingdraht: $P = 16{,}252$; $P_w = 15{,}205$; $P_2 = 1{,}102$; $P_w - P_2 = 14{,}103$; $P - (P_w - P_2) = 2{,}149$; $d = 7{,}6$ $V_{Mol} = 31$. Zinn ($Sn = 119$): $d = 7{,}3$, also $V_{At} = 16$. Zinkblende ($ZnS = 97$): $d = 4{,}0$, also $V_{Mol} = 24$.

An sehr dünnem geglühtem Messingdrahte werden gewogen: Magnesium ($Mg = 24$): $d = 1{,}7$, $V_{At} = 14$. Kupfer ($Cu = 63$): $d = 7{,}9$, $V_{At} = 8$. Aluminium ($Al = 27$): $d = 2{,}6$, $V_{At} = 10$.

b) Feste, in Wasser lösliche Körper. Man bestimmt den Gewichtsverlust des Körpers in irgend einer Flüssigkeit, in welcher er sich nicht löst, von der Dichte d_1 in derselben Weise wie bei a, dann ist

$$d = \frac{P \cdot d_1}{P - (P_f - P_2)}.$$

Beispiel: Krystall von Kalialaun [$AlK(SO_4)_2 + 12\,H_2O = 474$], $P = 4{,}551$. Krystall in Terpentinöl ($d_1 = 0{,}88$) $P_f = 2{,}253$. $P_2 = 0{,}052$. $P_f - P_2 = 2{,}201$. $P - (P_f - P_2) = 2{,}350$ gr. $d = 1{,}7$. $V_{Mol} = 279$.

[1]) Ist der Draht sehr dünn, so kann das nach unten ziehende Gewicht der an ihm capillar in die Höhe steigenden Flüssigkeit grösser sein als der Auftrieb; er erfährt dann beim Eintauchen nicht eine Gewichtsverminderung, sondern eine Gewichtsvermehrung (P_2 negativ).

c) Feste Körper, welche specifisch leichter sind als Wasser. In diesem Falle schwimmt der unter Wasser an einem Drahte aufgehängte Körper; er muss daher mit einem solchen von grösserem specifischen Gewichte beschwert werden; dazu hängt man an den Draht z. B. einen unter Wasser tauchenden Kupferdrahtbügel (vergl. Fig. 39).

Uebung.

1) Man wägt den Körper in der Luft, Gewicht . . . P.
2) Man wägt den Draht mit dem im Wasser befindlichen Kupferbügel, Gewicht . . . . . P_1.
3) Man wägt den Körper unter Wasser mit Draht und Kupferbügel, Gewicht . . . . P_2.

Das Gewicht des Körpers unter Wasser ist dann $P_2 - P_1$.

Der Gewichtsverlust . . . . $P - (P_2 - P_1)$,

also ist:

$$d = \frac{P}{P - (P_2 - P_1)}.$$

Beispiel: Paraffinklotz: $P = 14{,}20$ gr. Dünner Messingdraht mit Kupferbügel: $P_1 = 2{,}82$; $P_2 = 1{,}47$; $P_2 - P_1 = -1{,}35$ (negatives Vorzeichen: Auftrieb!); $P - (P_2 - P_1) = 14{,}20 + 1{,}35 = 15{,}55$ gr; $d = 0{,}91$.

d) Feste, pulverförmige Körper. Das Pulver wird in eine geeignete Masse, etwa Vaselin, eingeschmolzen und das ganze in Luft und Wasser gewogen.

Man verwendet dazu einen circa $2^1/_2$ cm weiten, 3 cm langen, kleinen Glaseimer, der von einem Reagirglase abgesprengt wird. Am oberen Rande sind durch drei Oeffnungen drei feine Messingdrähte gezogen, mittelst deren der Eimer an der hydrostatischen Waage aufgehängt wird.

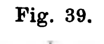
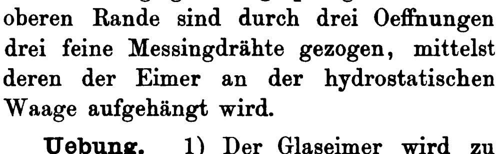


Fig. 39.



Uebung. 1) Der Glaseimer wird zu einem Drittel mit Vaselin gefüllt, das man durch gelindes Erwärmen schmilzt und dann erstarren lässt. Zum Vertreiben der Luftblasen aus der geschmolzenen Masse dient ein Glasspatel. Der Glasspatel bleibt im Gefässe.

2) Gewicht des Eimers in Luft . . p_l.

3) Gewicht in Wasser. . . . . p_w.

4) Man trocknet den Eimer mit Fliesspapier innen und aussen ab, erwärmt ihn, bis das Vaselin schmilzt, und schüttet so viel von dem Pulver hinein, dass der Eimer etwa bis zur Hälfte gefüllt ist. Durch Rühren mit dem Spatel werden wieder alle Luftblasen ausgetrieben.

5) Gewicht des Ganzen in Luft . . . . P_l.

6) Gewicht des Ganzen in Wasser . . . . P_w.

$P = P_l - p_l$ ist das Gewicht des Körpers in Luft, $P' = P_w - p_w$ in Wasser, also $P - P'$ der Gewichtsverlust $= V$. Die Dichte ist:

$$d = \frac{P}{P - P'}.$$

Beispiel: Glaspulver. $p_l = 10{,}590$ gr; $p_w = 3{,}030$ gr; $P_l = 16{,}159$ gr; $P_w = 6{,}370$ gr; $P = 5{,}569$ gr; $P' = 3{,}340$ gr; $V = P - P' = 2{,}229$ cbcm; $d = 2{,}498$.

2. Flüssigkeiten.

Wägt man denselben Körper vom Volumen v in zwei Flüssigkeiten von den Dichten d_1 und d_2, so sind die Gewichtsverluste R_1 und R_2 gleich den Gewichten der verdrängten Volumina, also:

$$R_1 = d_1 v \quad \text{und} \quad R_2 = d_2 v;$$

das Verhältniss der specifischen Gewichte ist demnach $d_2 : d_1 = R_2 : R_1$, also gleich dem Verhältniss der Gewichtsverluste.

Ist R_1 der Gewichtsverlust in Wasser, so ist $d_1 = 1$, also

$$d_2 = R_2 / R_1.$$

Uebung. 1) Man bestimmt das Gewicht P eines an einem dünnen Messingdraht aufgehängten Glaskörpers.

2) Man hängt den Körper in Wasser; Gewicht P_1, also $R_1 = P - P_1$.

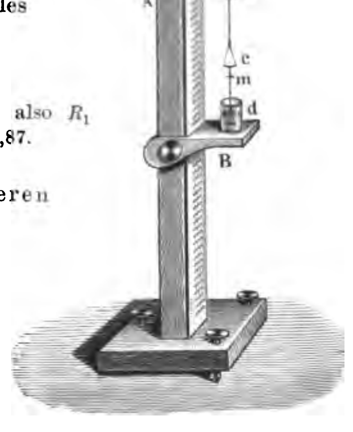
3) Man hängt den Körper in Terpentinöl; Gewicht P_2, also $R_2 = P - P_2$.

Dann ist die Dichte des Terpentinöles

$$d_2 = \frac{P - P_2}{P - P_1}.$$

Beispiel: $P = 12{,}67$; $P_1 = 7{,}60$, also $R_1 = 5{,}07$; $P_2 = 8{,}26$; $R_2 = 4{,}41$ gr; $d = 0{,}87$.

Fig. 40.



II. Bestimmungen mit besonderen Vorrichtungen.

A. Jolly's Federwaage (Fig. 40).

Sie besteht aus einer bei a befestigten Drahtspirale[1]), bei b ist ein Draht angebracht, welcher die beiden Waagschalen c und d trägt, von denen sich die eine in Luft, die andere in einer

[1]) Den Apparaten sind mehrere Spiralen beigegeben, die dickeren dienen für die schwereren, die dünneren für die leichteren Körper.

Flüssigkeit befindet. Letztere dient zugleich zur Dämpfung der Schwingungen. Bei m befindet sich als Marke eine kleine, längliche, weisse Glasperle. In das Stativ A ist ein in Millimeter getheilter Spiegelglasstreifen eingelegt.

Die Anwendung der Federwaage beruht darauf, dass die Verlängerungen der Feder proportional den Aenderungen der spannenden Gewichte sind. Die Verlängerung misst man an der Verschiebung der Marke m. Dazu visirt man über den oberen Rand der Perle nach dem Spiegelbilde, so dass letzteres sich mit dem direct gesehenen Rande deckt; man vermeidet auf diese Weise die Parallaxe (vergl. S. 56) und blickt dabei stets senkrecht zu der Scala.

Uebung. 1) Prüfung des Gesetzes: Die Verlängerungen sind proportional den aufgelegten Gewichten.

Man liest ab die Lage von m:

	Lage
1) ohne Belastung	a_0
2) mit 0,1 gr Belastung . . .	a_1
3) „ 0,2 „ „ . . .	a_2
4) „ 0,n „ „ . . .	a_n

Dann ist $a_2 - a_0 = 2\,(a_1 - a_0), \ldots . (a_n - a_0) = n\,(a_n - a_0)$, d. h. jedes 0,1 gr der Belastung bringt eine gleiche Dehnung hervor. Die 0,1 gr entsprechende Dehnung ist:

$$(a_n - a_0)/n = \alpha.$$

Beispiel: $a_0 = 323{,}5$; $a_1 = 333{,}0$; $a_2 = 343{,}0$; $a_3 = 352{,}5$; $a_4 = 362{,}0$; $a_7 = 392{,}0$; $\alpha = (a_7 - a_0)/7 = 68{,}5/7 = 9{,}8$.

Uebung. 2. Bestimmung der Dichte. 1) Man liest die Lage von m ohne Belastung ab . . . . a_0.

2) Man legt den Körper in die Schale c und verschiebt das Gefäss d durch Heben und Senken von B so, dass die Schale in der Mitte von d schwebt; ist die Schale in d an drei Fäden aufgehängt, so muss man die manchmal zwischen ihnen entstehende Wasserhaut durchstossen; Lage a_1.

3) Man legt den Körper in die Schale d unter Wasser und verfährt wie bei 2); Lage . . . . a_2.

Dann ist das Gewicht des Körpers in Luft $(a_1 - a_0)/\alpha \,.\, 0{,}1$ gr, das Gewicht in Wasser $(a_2 - a_0)/\alpha \,.\, 0{,}1$ gr, der Gewichtsverlust $(a_1 - a_2)/\alpha \,.\, 0{,}1$ gr, also die Dichte:

$$d = \frac{a_1 - a_0}{a_1 - a_2}.$$

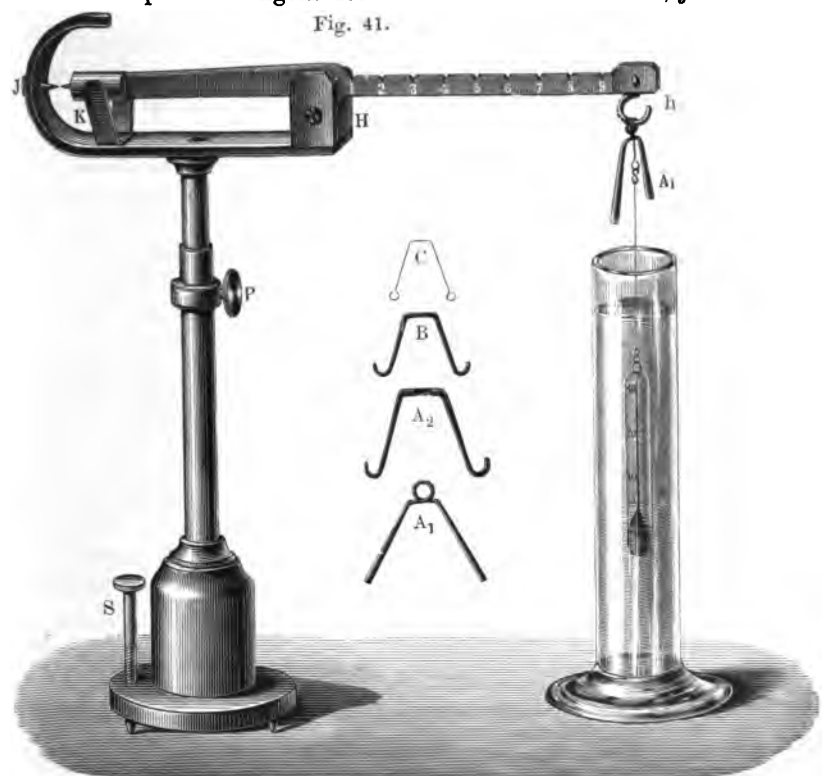
Der Factor $\alpha \,.\, 0{,}1$ fällt aus der Endgleichung heraus.

Beispiel: Ein Stück Glas in der Schale c: $a_1 = 450{,}3$; in der Schale d: $a_2 = 399{,}0$; $d = 126{,}8/51{,}3 = 2{,}5$.

B. Westphal-Mohr'sche Waage (Fig. 41). Sie dient zur bequemen Anwendung der S. 67 2) besprochenen Methode.

An dem Ende eines in 10 Theile getheilten Waagebalkens hängt als Senkkörper ein Thermometer, das in die zu untersuchende Flüssigkeit gesenkt wird und deren Temperatur angiebt. Ein Gegengewicht K (Fig. 41) hält dem Thermometer in der Luft das Gleichgewicht. Die Gewichte sind Reiter von drei verschiedenen Grössen. Die beiden grössten, einander gleichen, A_1 und A_2, sind gleich dem Gewichte des vom Senkkörper verdrängten destillirten Wassers bei 15° C., jedes der-

Fig. 41.



selben compensirt also den Auftrieb im Wasser, wenn es an dem Haken h hängt. Das Gewicht B wiegt $^1/_{10}$, das Gewicht C $^1/_{100}$ von A.

Wird das Thermometer in irgend eine Flüssigkeit gehängt, so kann man den Auftrieb durch Anhängen der Reiter an passende Stellen compensiren. Erhalten wir Gleichgewicht, wenn man die drei Reiter A, $B = 0{,}1\ A$ und $C = 0{,}01\ A$ auf die Theilstriche $a\,b\,c$ des Waagebalkens setzt, so ist nach dem Hebelprincip der Gewichtsverlust

$$S = {}^1/_{10}\, a \,.\, A + {}^1/_{10}\, b \,.\, 0{,}1\, A + {}^1/_{10} \,.\, c \,.\, 0{,}01\, A = 0, abcA.$$

Da der Gewichtsverlust in Wasser gleich A ist, so ist die Dichte der Flüssigkeit (S. 67)

$$d_2 = S/A = 0,\ a\,b\,c.$$

Uebung 1. 1) Man stellt zunächst die Waage durch Drehen an der Schraube S so, dass die Spitze bei K genau der bei J gegenübersteht.

2) Man hängt das Thermometer in Wasser und überzeugt sich, dass das Gewicht A dem Auftrieb in diesem das Gleichgewicht hält.

3) Man ersetzt das Wasser durch Alkohol und bestimmt die Lage abc der drei Reiter, bei der wieder Gleichgewicht besteht. Die Dichte ist dann $d_2 = 0,\ abc$.

4) Man ersetzt das Wasser durch eine Salzlösung und bestimmt die entsprechenden Lagen $a_1\, b_1\, c_1$. Hier, bei Dichten grösser als 1, wendet man noch den zweiten Reiter $A_2 = A_1 = A$ an, den man am Ende des Waagebalkens lässt. Dann ist $d_2 = 1,\ a_1\, b_1 c_1$.

Fig. 42.

A B C

Uebung 2. Man bestimmt die Dichte einer Lösung von Kalium-Quecksilberjodid (Thoulet'sche Lösung): 2,8; in dieselbe wird ein Gypskrystall geworfen: derselbe schwimmt, dann ein Magnetitkrystall, derselbe sinkt unter; ersterer hat eine Dichte kleiner als 2,8, letzterer eine grössere als 2,8. Hierauf hat man eine Methode der Trennung von dichteren und weniger dichten Substanzen gegründet; dieselbe besteht darin, dass man Gemenge in fein gepulvertem Zustande mit einer Lösung von mittlerer Dichte schüttelt und dann von den am Boden sich absetzenden schwereren Theilen die Flüssigkeit mit den in derselben schwebenden leichteren abgiesst.

C. Nicholson'sche Senkwaage (Fig. 42).

Dieselbe besteht aus einem cylindrischen Hohlkörper B, an dem mittelst eines Stabes eine Schale zum Auflegen von festen Körpern befestigt ist, während an dem unteren Ende eine Waagschale zu demselben Zwecke angebracht ist. Um das vollständige Untersinken des Körpers B zu verhindern, wird ein Messingbügel über das äussere Gefäss gelegt. Soll der Schwimmkörper B, der für sich, ohne Gewichte auf A, nur bis q eintaucht, bis zur Marke bei o eintauchen, so muss man auf A ein bestimmtes Gewicht P auflegen; ist die Senkwaage durch einen Körper vom Gewicht π belastet, so hat man bis zum Eintauchen bis zur Marke o nur ein Gewicht $p = P - \pi$ aufzulegen. Man erhält so das Gewicht $\pi = P - p$.

Uebung. Man legt Gewichte auf A, bis die Senkwaage bis zur Marke o eintaucht:

1) wenn kein Körper auf A liegt, Gewicht . . P,
2) wenn der Körper auf A liegt, Gewicht. . . P_1,
3) wenn der Körper auf C liegt, Gewicht. . . P_2.

$P_2 - P_1$ ist der Gewichtsverlust, wenn der Körper von der oberen Waagschale in der Luft in die untere im Wasser kommt; dann ist:

$$d = \frac{P - P_1}{P_2 - P_1}.$$

Beispiel: $P = 32{,}7$. Ein Messingklötzchen auf A: $P_1 = 12{,}0$, auf C: $P_2 = 14{,}4$; $P_2 - P_1 = 2{,}4$; $P - P_1 = 20{,}7$; $d = 8{,}6$.

D. Aräometer.

Princip. Ein schwimmender Körper taucht so tief in die Flüssigkeit ein, dass die von ihm verdrängte Flüssigkeit ebenso viel wiegt wie er selbst.

Uebung (vergl. Fig. 43). Der Schwimmkörper A wird, zusammen mit dem Becherglase B, auf einer gewöhnlichen Waage durch Schrot austarirt. Der Glascylinder C, in den seitlich das Rohr E eingekittet ist, wird bis zur Mündung F desselben mit Wasser gefüllt. Hierauf wird das Becherglas B unter E gestellt und der Körper A in das Gefäss C gesenkt. Er verdrängt eine gewisse Menge Wasser, die nach B hinüberfliesst; ihr Volumen entspricht der Tiefe seines Eintauchens. Stellt man das Becherglas sammt Inhalt, aber ohne den Schwimmkörper, wieder auf die Waage, so tritt bei derselben Tara wie vorher Gleichgewicht ein. Das Gewicht der nach B hinübergedrängten Wassermenge ist also gleich dem Gewichte von A.

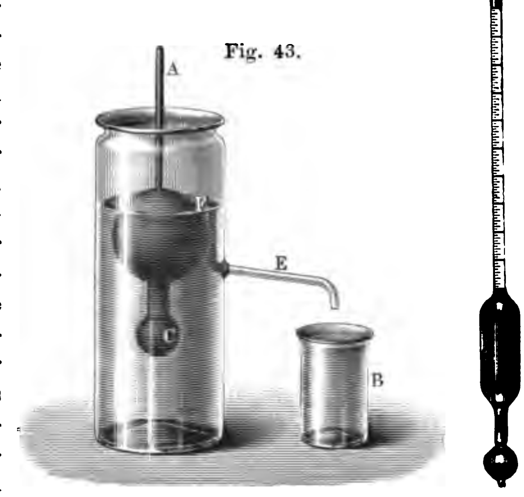


Fig. 43.

Fig. 44.

Apparat. Das Aräometer (Fig. 44) besteht aus einem unteren weiteren Theile und einem oberen, engeren, genau cylindrischen Theile. An den unteren ist eine kleine Kugel angeblasen, die zum Theil mit Quecksilber gefüllt ist; das Gewicht desselben bewirkt, dass das Aräometer in aufrechter Stellung schwimmt. Vielfach ist dieses Quecksilber zugleich zur Füllung einer Thermometerkugel benutzt, deren Capillare in den oberen cylindrischen Theil des Instrumentes hineinragt.

Auf dem oberen engeren Theile des Aräometers ist eine Theilung angebracht, an der die specifischen Gewichte oder Dichten da abgelesen werden, wo die Flüssigkeitsoberfläche die Theilung schneidet.

Bei Aräometern für Flüssigkeiten von geringerer Dichte als Wasser

liegt der der Dichte 1,000 entsprechende Punkt am untersten Ende der Scala, bei solchen für Flüssigkeiten von grösserer Dichte am obersten.

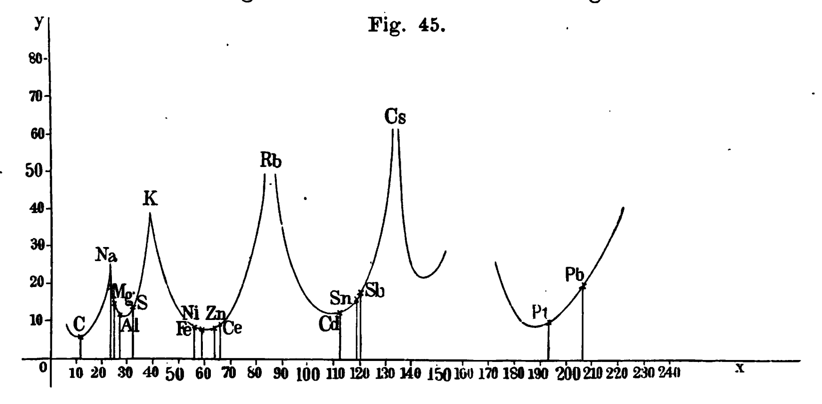
Uebung. Man bestimmt mit dem Aräometer die Dichte von demselben Alkohol und derselben Kochsalzlösung, wie bei den Versuchen mit der Westphal'schen Waage.

Allgemeines über Atomvolumen und Molecularvolumen.

Um die Beziehung zwischen Atomvolumen und Atomgewicht möglichst leicht zu übersehen, stellt man dieselbe graphisch dar (vgl. S. 7). Dazu nimmt man Coordinatenpapier, d. h. Papier, das mit horizontalen und verticalen Linien versehen ist, und verzeichnet von dem Punkte *o* an auf der horizontalen Linie *ox* Punkte in Abständen, die den Atomgewichten der einzelnen Elemente proportional sind. Auf den Lothen in diesen Punkten trägt man nach oben Längen ab, die jeweilig den gefundenen Atomvolumen proportional sind.

So wurde für das Eisen (Fe = 56) (vgl. S. 58) das Atomvolumen gleich 7,3 gefunden. Man sucht auf der horizontalen Axe (Fig. 45) den Punkt 56 und geht auf der hier nach oben gehenden Linie um

Fig. 45.



7,3 Einheiten aufwärts. Dadurch gelangt man zu dem durch ein * bezeichneten Punkt Fe. Weiter fanden wir für:

	Atomgewicht	Atomvolumen		Atomgewicht	Atomvolumen
C (Graphit)	12	5	Cu	63	8
Na	23	24	Zn	65	9
Mg	24	14	Cd	112	12
Al	27	11	Sn	119	16
S	32	16	Sb	120	18
Fe	56	7,3	Pt	194	10
Ni	59	7	Pb	206	19

Wir wissen ferner, dass das Kalium (K = 39) auf Wasser schwimmt. Hätte es die Dichte 1, so wäre sein Atomvolumen 39, in Wirklichkeit ist es noch etwas grösser. Ferner ist die Dichte von Rubidium (Rb = 85) und Cäsium (Cs = 133) klein, also das Atomvolumen sehr gross. Trägt man auf Grund dieser Bestimmungen Punkte in das Coordinatenpapier ein, und verbindet man alle diese Punkte durch eine Curve, wie es in Fig. 45 angedeutet ist, so sieht man, dass das Atomvolumen nicht mit wachsendem Atomgewicht stetig wächst oder abnimmt, sondern abwechselnd zu- und abnimmt. Auf Elemente mit kleinem Atomvolumen folgen solche mit grösserem, auf diese wieder solche mit kleinerem, dann wieder solche mit grösserem Atomvolumen u. s. w. Die Curve zeigt also einen sich mehrfach wiederholenden Hin- und Hergang, sie stellt eine „periodische Anordnung“ dar.

Das Atomvolumen ändert sich periodisch mit dem Atomgewicht.

In der Tabelle (S. 75) sind die Atomgewichte, Dichten und Atomvolumen nach den neuesten Bestimmungen zusammengestellt, danach ist die Curve (Fig. 46 a. f. S.) gezeichnet [1].

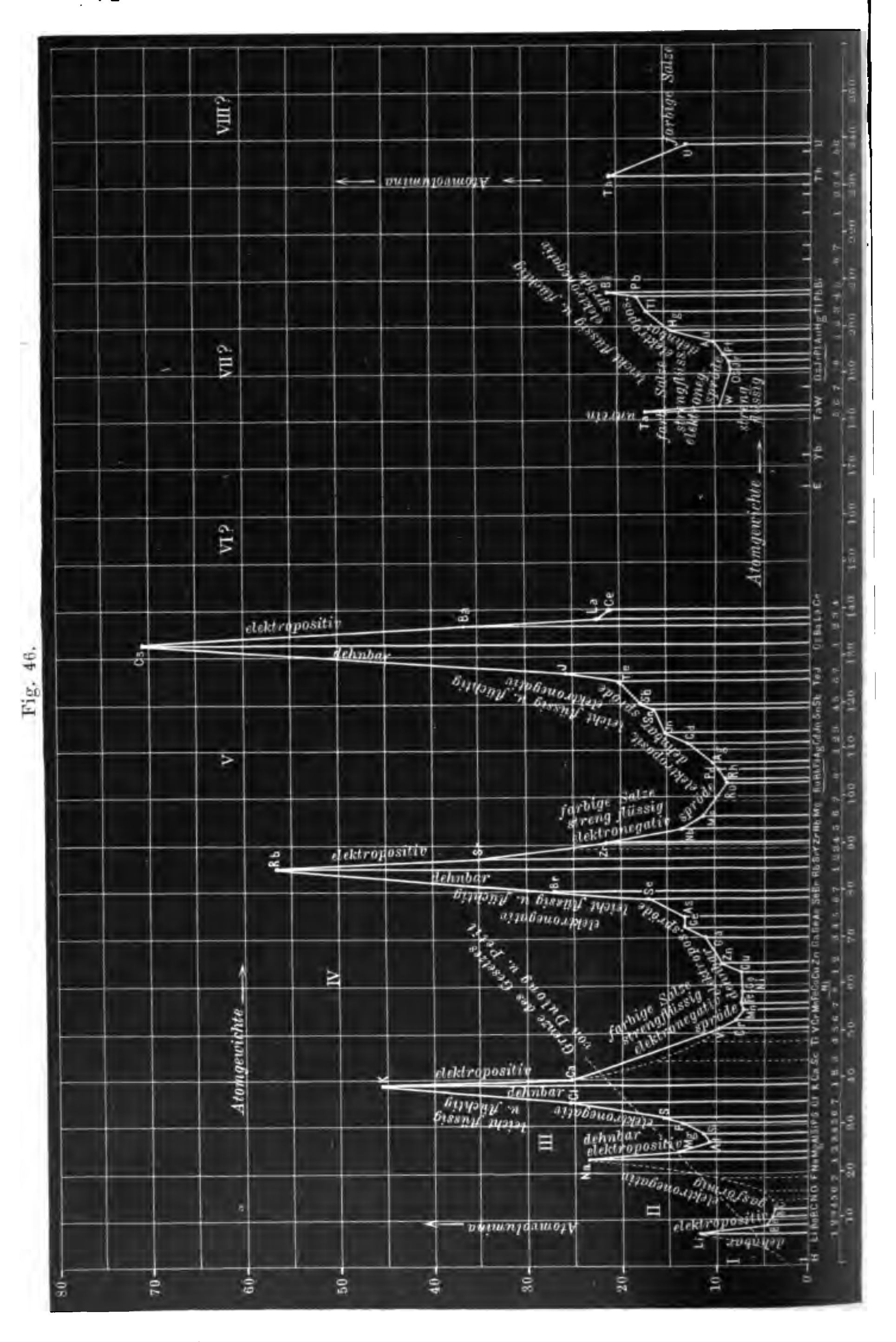
Mit wachsendem Atomgewicht nimmt das Atomvolumen regelmässig ab und zu. Die Curve, welche seine Aenderungen darstellt, wird durch fünf Maxima in sechs Abschnittte zerlegt, welche etwa die Form an einander gereihter Kettenlinien zeigen, unter denen die zweite und dritte und ebenso die vierte und fünfte einander sehr ähnlich sind und nahezu gleichen Stücken der Abscissenaxe entsprechen.

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Elemente hängen sehr nahe mit ihrer Stellung auf der Curve zusammen, so dass an entsprechenden Stellen der einander ähnlichen Curvenstücke ähnliche Elemente stehen. Die Maxima der Curve werden durch leichte, die drei letzten Minima durch schwere Metalle gebildet. Ferner liegen analoge Elemente wie Cl, Br, J, oder S, Se, Te, oder Ca, Sr, Ba an entsprechenden Stellen der Curve. Aber auch bei gleichen oder nahezu gleichen Atomvolumen sind die Eigenschaften sehr verschieden, je nachdem das Element auf einem steigenden oder fallenden Curvenaste liegt, je nachdem ihm also ein kleineres oder ein grösseres Atomvolumen zukommt als dem Elemente mit nächst grösserem Atomgewichte. Beispiele für diesen Satz liefern P und Mg, Cl und Ca, N und In, Mo und Cd u. a. m.

Dieses Auftreten periodischer Aenderungen in den Eigenschaften der Elemente, bei wachsendem Atomgewicht, das sich nicht nur bei den physikalischen, sondern auch bei den chemischen Eigenschaften zeigt, fasst man unter dem Namen zusammen: Periodisches System der Elemente nach Mendelejeff und L. Meyer.

2. Das Molecularvolumen. Für feste Verbindungen gilt u. a.

[1] Die Tabelle sowie die Curve verdanken wir der grossen Güte des Herrn Prof. Dr. Seubert in Hannover.



Atomgewichte
Atomvolumina
I
II
III
IV
V
VI?
VII?
VIII?
elektropositiv
dehnbar
elektronegativ
leicht flüssig u. flüchtig
farbige Salze
strengflüssig
spröde
Grenze des Gesetzes von Dulong u. Petit
farbige Salze

Fig. 46.

Tabelle der Atomgewichte, specifischen Gewichte und Atomvolumen.

Elemente	Symbol	Atom-gewicht	Specif. Gewicht	Atom-volum	Elemente	Symbol	Atom-gewicht	Specif. Gewicht	Atom-volum
Wasserstoff . . .	H	1,00	—	—	Strontium	Sr	86,96	2,50	34.8
Lithium	Li	6,97	0,59	11,8	Yttrium	Y	88,3	3,6?	25?
Beryllium	Be	8,98	1,85	4,9	Zirkonium . . .	Zr	89,9	4,15	21,7
Bor	B	10,85	2,68	4,0	Niobium	Nb	93,2	7,06	13,2
Kohlenstoff . . .	C	11,91	3,3	3,6	Molybdän	Mo	95,31	8,6	11,1
Stickstoff	N	13,94	3?	5?	Ruthenium . . .	Ru	100,9	12,26	8,3
Sauerstoff	O	15,88	2?	8?	Rhodium	Rh	102,2	12,1	8,4
Fluor	F	18,96	1,5?	13?	Palladium . . .	Pd	105,0	11,5	9,1
Natrium	Na	22,88	0,97	23,6	Silber	Ag	107,11	10,5	10,2
Magnesium . . .	Mg	24,18	1,74	13,9	Cadmium	Cd	111,1	8,65	12,8
Aluminium . . .	Al	26,90	2,56	10,5	Indium	In	113,1	7,42	15,2
Silicium	Si	28,16	2,49	11,3	Zinn	Sn	118,20	7,29	16,2
Phosphor	P	30,80	2,3	13,4	Antimon	Sb	119,0	6,7	17,8
Schwefel	S	31,82	2,04	15,6	Tellur	Te	126,6	6,25	20,2
Chlor	Cl	35,19	1,38	25,5	Jod	J	125,90	4,94	25,5
Kalium	K	38,83	0,86	45,2	Cäsium	Cs	132,0	1,88	70,2
Calcium	Ca	39,71	1,57	25,3	Baryum	Ba	136,40	3,75	36,5
Scandium	Sc	43,75	2,6?	17?	Lanthan	La	137,3	6,2	22,5
Titan	Ti	47,8	3,7?	13?	Cer	Ce	139,2	6,7	21,0
Vanadium	V	50,8	5,5	9,2	Erbium	E	165,1	—	—
Chrom	Cr	51,74	6,8	7,6	Ytterbium	Yb	171,7	—	—
Mangan	Mn	54,52	8,0	6,8	Tantal	Ta	181,1	10,8	16,8
Eisen	Fe	55,60	7,8	7,1	Wolfram	W	182,7	19,13	9,6
Kobalt	Co	59,1	8,5	6,9	Osmium	Os	189,3	22,48	8,4
Nickel	Ni	58,4	8,8	6,6	Iridium	Ir	191,5	22.42	8,5
Kupfer	Cu	63,12	8,9	7,1	Platin	Pt	193,3	21,50	9,0
Zink	Zn	64,91	7,15	9,1	Gold	Au	195,7	19,3	10,1
Gallium	Ga	69,6	5,96	11,7	Quecksilber . . .	Hg	198,8	13,59	14,7
Germanium . . .	Ge	71,9	5,47	13,1	Thallium	Tl	202,7	11,86	17,1
Arsen	As	74,5	5,67	13,1	Blei	Pb	205,35	11,38	18,0
Selen	Se	78,47	4,6	17,0	Wismuth	Bi	207,3	9,82	21,1
Brom	Br	79,35	2,97	26,7	Thorium	Th	230,7	11,1	20,8
Rubidium	Rb	84,8	1,52	55,8	Uran	U	237,6	18,69	12,7

der Satz: Isomorphe Verbindungen haben sehr nahe gleiche Molecularvolumina. So wurde S. 64 das Molecularvolumen des Chromalauns zu 277 bestimmt, S. 65 das des Kalialauns zu 279.

Das Molecularvolumen ebenso wie das Atomvolumen stellt aber nicht den Raum dar, welchen die Molecüle selbst einnehmen, sondern in ihm ist auch noch der zwischen den Molecülen befindliche, von

gewöhnlicher Materie freie Raum enthalten. Die experimentell bestimmte Dichte ist nicht diejenige der Molecüle selbst, d. h. der Quotient aus ihrer Masse durch den von ihnen selbst eingenommenen Raum, sondern der Quotient aus ihrer Masse durch den von ihnen selbst eingenommenen Raum plus den zwischen ihnen liegenden Räumen, worauf schon Berzelius hinwies. Die Dichte der Atome selbst ergiebt sich aus theoretischen Betrachtungen, z. B. bei Wasserstoff zu 360, sie ist also sehr viel grösser als für die dichtesten festen Körper.

Das Molecularvolumen giebt daher nur dann ein relatives Maass für die Volumina der Molecüle verschiedener Körper, wenn entweder die sämmtlichen Molecüle genau an einander liegen (dann müssten wir eine continuirliche Raumerfüllung durch die Materie annehmen), oder wenn das Gesammtvolumen bei allen Körpern genau das gleiche Vielfache des Voluminhaltes der Molecüle selbst ist. Dies ist aber im Allgemeinen nicht der Fall. Auch spielen hierbei die Drucke, unter denen sich die Körper befinden, sowie deren Temperatur eine grosse Rolle. Temperaturen und Drucke, bei denen man am ehesten einfache Beziehungen erwarten könnte, hat man früher als entsprechende Zustände bezeichnet. Für die festen Körper sollten es die Schmelzpunkte, für die Flüssigkeiten die Temperaturen sein, bei denen ihre Dämpfe gleiche Spannkräfte besitzen, also z. B. die Siedepunkte; in Wirklichkeit sind bei Flüssigkeiten entsprechende Zustände solche, bei denen die Temperaturen gleiche Bruchtheile der kritischen Temperatur und die Drucke gleiche Bruchtheile der kritischen Drucke sind (vergl. Dampfdruck und Siedepunkt).

3. Abhängigkeit des Molecularvolumens einer Verbindung von dem Atomvolumen der darin enthaltenen Elemente.

Es fragt sich, ob die Molecularvolumina der Verbindungen sich als Summe der Volumina der in ihnen enthaltenen Atome darstellen lassen.

Hat z. B. eine Verbindung $A_a B_b C_c D_d \ldots$ ($ABCD$ sind die Zeichen für die Elemente, und die Indices geben an, wie oft deren Atome in der Verbindung enthalten sind) das Molecularvolumen V, und ist letzteres gleich der Summe der Volumina der einzelnen in ihr enthaltenen Atome, so kann man die Annahme machen, dass

$$V = [a v_A + b v_B + c v_C + \cdots\cdots].$$

Dabei bezeichnen v_A, v_B, $v_C \ldots$ die Volumina, welche den Atomen der Elemente $ABC\ldots$ zukommen. Um v_A, v_B, $v_C \ldots$ zu bestimmen, vergleicht man die Molecularvolumina von Verbindungen, in denen die a, b, $c\ldots$ verschiedene Werthe haben. Eventuell bestimmt man auch zunächst das Molecularvolumen eines Atomcomplexes $A_a B_b$, so z. B. wenn man die Molecularvolumina der einzelnen Glieder einer homologen Reihe von einander subtrahirt, um das Molecularvolumen von CH_2 zu erhalten. Eine Vergleichung der Aldehyde mit den Säuren liefert $v(O)$,

eine Vergleichung von Oxyden und Sulfiden hieraus *v* (*S*). Hat man das Atomvolumen des Wasserstoffs gefunden, so folgen diejenigen des Chlors, Broms, Jods etc. aus den Halogensubstitutionsproducten. Zu beachten ist bei diesen Berechnungen, ob die Art der Bindung der Elemente in den betreffenden Verbindungen eine gleiche ist oder nicht, ob Doppelbindungen (Lücken nach Brühl) auftreten und so fort.

Man hat mit Ostwald zwischen additiven und constitutiven Eigenschaften der Verbindungen unterschieden, die ersteren hängen nur von der Art und der Zahl der in einem Molecül zusammentretenden Atome ab, die letzteren auch von ihrer gegenseitigen Bindung. In erster Annäherung erscheinen die meisten Eigenschaften als additive, eine genauere Untersuchung zeigt aber, dass sie constitutive sind. So ist das Atomvolumen vieler Elemente angenähert constant in den verschiedenen Verbindungen, die kleinen Aenderungen rühren von der Art der Bindung her.

Die oben aufgestellte Gleichung hat übrigens durchaus keine allgemeine Gültigkeit, ganz abgesehen davon, dass die einzelnen Elemente meist nicht mit demjenigen Atomvolumen in eine Verbindung eintreten, welches ihnen im unverbundenen Zustande zukommt. Wir fanden z. B. auf S. 65 für PbS und ZnS die Molecularvolumina 31 bezw. 24. Für die Elemente S, Pb und Zn war $V_{At} = 16$, 18 und 9, die Summen der betreffenden Atomvolumina sind hier 34 und 27, also beide um drei Einheiten grösser als die gefundenen Molecularvolumina.

V. Verhalten der Gase bei Druck- und Temperaturänderungen.

1. Das Volumenometer (Stereometer).

Gebraucht wird: **Volumenometer (Fig. 47), Stativ mit Rolle und Schnur, cylindrischer Paraffinklotz, Becherglas, Gummischlauch, Glaseinsatz im Volumenometer.**

Princip. Bei dem Volumenometer kommt zur Anwendung das Boyle'sche (Mariotte'sche) Gesetz:

Die von derselben Menge Gas eingenommenen Volumina verhalten sich bei constanter Temperatur und bei verschiedenen Drucken umgekehrt wie die Drucke.

Sind V_1 und V_2 die Volumina, welche dieselbe Gasmenge bei den Drucken p_1 und p_2 einnimmt, so ist:

$$V_1 : V_2 = p_2 : p_1 \quad \text{oder} \quad V_1 p_1 = V_2 p_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Bei den Volumenometern wird ein bekanntes Gasvolumen V durch Einbringen eines festen oder flüssigen Körpers um das zu bestimmende Volumen φ desselben vermindert und aus den Druckänderungen, die eintreten, wenn man die Volumina V resp. $V - \varphi$ in messbarer Weise verändert, ein Rückschluss auf das unbekannte Volumen φ gemacht.

Fig. 47.

Apparat. Das Volumenometer nach Say besteht aus einem cylindrischen Gefässe A mit abgeschliffenem Rande a und aufgeschliffenem Deckel d mit Hahn H. An A ist ein cylindrisches, in Millimeter von 0 bis x getheiltes Glasrohr B angesetzt, der Nullstrich befindet sich in der Nähe des oberen Rohrendes. B taucht in ein mit Wasser gefülltes Standgefäss W. Der Deckel d wird nach Einfetten des Randes a auf diesen luftdicht aufgedrückt. Um Erwärmungen zu vermeiden, fasst man das Gefäss A während der Messung nicht mit den Händen an, sondern zieht es an einem Faden s, der über eine Rolle geht, in die Höhe. Der Faden theilt sich oberhalb von R in drei Theile, die um den unteren Rand von a geschlungen sind. Bei diesem Apparate ist das

Volumen von A bis 0 dasjenige Volumen V, welches durch das Einbringen des zu messenden Körpers verändert wird.

Uebung 1. 1) Man füllt W bis zum Nullpunkt der Scala auf B mit Wasser, setzt den Deckel bei geöffnetem Hahn H auf und lässt den Apparat einige Zeit stehen, damit alle Theile eine constante Temperatur annehmen.

2) Man schliesst H und zieht das Volumenometer in die Höhe, liest, sobald das an den Wänden mit emporgehobene Wasser herabgelaufen ist und der Flüssigkeitsmeniscus eine feste Stellung eingenommen hat, die Stellung der Wassersäule im getheilten Rohre $= a_1$ mm, und die Stellung des Wasserspiegels an der Scala $= a_2$ mm ab.

3) Man legt in A den zu messenden Körper, etwa einen Paraffinklotz, senkt wieder den Apparat bis zum Nullpunkt der Scala in das Wasser und drückt den Deckel bei geöffnetem Hahn wieder auf. (Für die Uebungen ist es zweckmässig, den Körper möglichst gross zu wählen.)

4) Nach einiger Zeit schliesst man den Hahn und zieht das Volumenometer heraus; Stellung der Wassersäule an der Scala $= b_1$ mm, Stellung des Wasserspiegels an der Scala $= b_2$ mm.

5) Man nimmt den Deckel ab, entfernt den Körper, füllt das getheilte Rohr bis zum Nullstrich mit Wasser, das man in ein Becherglas fliessen lässt. Man wägt das Becherglas mit dem Wasser. Gewicht: p_2 gr.

6) Man wägt das Becherglas für sich: Gewicht p_1.

7) Man liest den Barometerstand ab, der, auf 0° reducirt, gleich b sei.

Berechnung. Das einem Millimeter der Scala auf B entsprechende Volumen ist $(p_2 - p_1)/x = c$ cbcm. Die Höhen der Wassersäulen bei 2 und 4 sind $a_1 - a_2$ bezw. $b_1 - b_2$; durch Division mit 13,6 erhält man die Höhen entsprechender Quecksilbersäulen h und h'. Im Falle 2 hat man dann:

$$\frac{V + a_1 c}{V} = \frac{b}{b - h} \quad \text{oder} \quad V = \frac{a_1 c (b - h)}{h}.$$

Im Falle 4 ist:

$$\frac{V - \varphi + b_1 c}{V - \varphi} = \frac{b}{b - h'}, \quad \text{also} \quad \varphi = V - \frac{b_1 c (b - h')}{h'}.$$

Beispiel: $a_1 = 75$ mm; $a_2 = 282$ mm; $b_1 = 29$ mm; $b_2 = 294$ mm; $p_2 - p_1 = 20$ gr; $x = 400$ mm; $b = 745$; $c = 1/20$; $V = 180$ cbcm; $\varphi = 180 - 54 = 126$ cbcm.

Uebung 2. Dichtebestimmung von pulverförmigen Körpern. Die Körper werden in einen kleinen Glascylinder gebracht, der den cylindrischen Raum A möglichst erfüllt und gleich von vornherein in demselben steht; sonst wird wie bei Uebung 1 verfahren.

2. Das Luftthermometer.

Gebraucht wird: Luftthermometer (Fig. 48), Blechgefäss für Eis und für Wasserdampf, kleines Thermometer, grosser Eisentopf als Wasserbad, Rührer, Dreifuss, grosser Brenner, Thermometer am Stativ zum Vergleichen, beiderseitig mit Stanniol beklebter Pappschirm zwischen Luftthermometer und Wasserbad, Eis oder Schnee, eventuell Kathetometer.

Princip. Bei dem Luftthermometer kommt zur Anwendung das Charles'sche (oder Gay-Lussac'sche) Gesetz:

Die von derselben Menge Gas eingenommenen Volumina wachsen bei constantem Drucke proportional mit der Temperatur. Die von derselben Menge Gas ausgeübten Drucke wachsen bei constantem Volumen proportional mit der Temperatur.

Das Volumen einer abgeschlossenen Menge Gas sei V_0 bei der Temperatur 0^0 und dem Drucke p_0. Wir erhalten zunächst den Druck constant, dann ändert sich V_0 beim Erhitzen um t^0 um $\alpha V_0 t$, wenn α der Ausdehnungscoëfficient ist; das Volumen bei t^0 ist:

$$V_t = V_0 + \alpha V_0 t = V_0 (1 + \alpha t) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Halten wir das Volumen constant, so ändert sich p_0 beim Erhitzen um t^0 um $\alpha' p_0 t$, wenn α' der Spannungscoëfficient ist; der Druck bei t^0 ist:

$$p_t = p_0 + \alpha' p_0 t = p_0 (1 + \alpha' t) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Dabei ist α' sehr nahe gleich α, nur etwas grösser.

Die beiden Gleichungen 1) und 2) sind, wenn man $\alpha = \alpha'$ setzt, specielle Fälle einer allgemeineren, welche das Boyle-Charles'sche, bezw. Mariotte-Gay-Lussac'sche Gesetz ausdrückt:

$$p_t V_t = p_0 V_0 (1 + \alpha t) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Die Gleichung 3) geht in 1 über, wenn man den Druck constant erhält, also $p_t = p_0$ setzt, sie geht in 2 über, wenn man das Volumen constant erhält, also $V_t = V_0$ setzt.

Setzt man $t =$ Const., so ist $p_0 V_0 (1 + \alpha t) =$ Const., also $p_t V_t$ $=$ Const., man erhält das Boyle'sche Gesetz, S. 78.

α und ebenso α' haben für alle Gase und Dämpfe, die hinlänglich weit von ihrem Sättigungspunkte entfernt sind, nahezu den Werth

$$\alpha = \alpha' = 0{,}003665 = {}^1/_{273}.$$

Apparat. An ein cylindrisches Glasgefäss n (Fig. 48) ist ein Capillarrohr a_1 angeschmolzen. Bei c_1 ist an dasselbe ein seitliches Rohr g mit Hahn H angesetzt, mit welchem ein Chlorcalciumrohr verbunden wird; bei d ist es an ein ca 10 mm weites Rohr b angeschmolzen, dessen unteres Ende in einen Stahlhahn h eingekittet ist. Unmittelbar unterhalb der Ansatzstelle d ist in b eine kleine schwarze Spitze σ (s. Fig. 49) eingeschmolzen. Der Hahn h hat die Gestalt Fig. 50.

Durch die Durchbohrung *q* kann man die beiden Röhren *b* und *r* mit einander in Verbindung setzen, während durch die Durchbohrung *p* entweder *b* oder *r* mit der umgebenden Luft communiciren kann. Das



Fig. 49. Fig. 50. Fig. 48.

den Hahn *h* tragende Stahlstück wird mittelst einer Ueberfangschraube an einem zweiten befestigt, an welches ein umsponnener Kautschukschlauch *s* angebunden ist, der zu einem Glasrohr *a* führt, das mittelst eines Schlittens mit Mikrometerschraube *c* in einer Führung auf und nieder bewegt wird. Das Rohr *b*, der Kautschukschlauch *s* und das Rohr *a* sind mit Quecksilber gefüllt. Das Ganze ist an einer Säule *AB* befestigt, in die ein Glasstreifen mit Millimetertheilung eingelegt ist.

Das Gefäss *n* wird in ein doppelwandiges Gefäss gesetzt, dessen äusserer Raum mit fein gestossenem Eis gefüllt wird. Ein anderes, ebenfalls doppelwandiges Gefäss dient als Siedegefäss (vgl. Fig. 88). Beim Vergleichen des Luftthermometers mit einem Quecksilberthermometer wird ein grösseres Wasserbad verwendet; ein passend ausgeschnittener Pappschirm wird zwischen *n* und die Säule *AB* gestellt, um die nicht im Wasserbade befindlichen Theile des Apparates möglichst gegen Wärmestrahlung zu schützen.

Uebung 1. Bestimmung des Verhältnisses der Volumina der erwärmten und nicht erwärmten Theile des Luftthermometers. 1) Man nimmt die Glastheile *n* bis *b* von dem Stahlhahn *h*

ab und füllt n und den Theil des Capillarrohres, der sich in dem Raume befindet, dessen Temperatur bestimmt werden soll, mit Quecksilber; seine Temperatur sei t^0, sein Gewicht Q.

2) Man füllt ebenso die anderen Theile des Luftthermometers mit Quecksilber von der Temperatur t^0; sein Gewicht sei q.

Dann sind, wenn d die Dichte des Quecksilbers bei t^0 ist, die Volumina V und φ bei t^0

$$V = Q/d; \quad \varphi = q/d.$$

Die Volumina von n und der Röhrentheile bis d sind dann bei 0°: $V_0 = V/(1 + 3\beta t)$ und $\varphi_0 = \varphi/(1 + 3\beta t)$, wo 3β der cubische Ausdehnungscoëfficient des Glases (= 0,000025) ist. Wir setzen das Verhältniss $\varphi_0/V_0 = \mu$.

Uebung 2. Füllen des Luftthermometers mit Luft von 0° und bestimmtem Druck.

1) Man setzt die Glastheile wieder an und trocknet das Gefäss n des Luftthermometers nebst den anstossenden Theilen. Dazu verbindet man g, während der Hahn h die in Fig. 50 angegebene Lage hat, mit einem Dreiweghahn; die eine der drei Ansatzröhren desselben führt zu einer Luftpumpe, die zweite zu einem Trockenapparat, die dritte ist mit g verbunden. Man setzt n in das Siedegefäss, evacuirt abwechselnd und lässt trockene Luft zu, bis alle Feuchtigkeit aus n entfernt ist.

2) Man schliesst den Hahn H, nimmt den Dreiweghahn fort, setzt an H ein Chlorcalciumrohr und öffnet wieder H.

3) Man setzt das Gefäss n in Eis oder Schnee, hängt neben b ein Thermometer (Temperatur τ), dreht den Hahn h um 90°, so dass b und r (Fig. 50) mit einander communiciren, hebt und senkt den Schlitten so lange durch Drehen an der Schraube c, bis das Quecksilber in b die schwarze Spitze berührt. Dies erkennt man daran, dass das Spiegelbild der Spitze im Quecksilber und diese selbst sich vollkommen berühren. Dann schliesst man den Hahn H.

4) Man liest entweder an der eingelegten Spiegelglasscala oder mit dem Kathetometer ab: a) die Differenz der Höhen der Quecksilberkuppen in den Röhren a und b, sie sei reducirt (vgl. S. 27) δ; b) den Barometerstand, er sei reducirt b; c) die Temperatur τ.

Die Grösse δ ist durch den Unterschied in den Capillardepressionen in den Röhren b und a bestimmt, sie ist, je nachdem sie positiv oder negativ ist, zu der bei irgend einer Messung gefundenen Höhendifferenz in a und b zu addiren oder von ihr abzuziehen. Der Druck, unter dem die abgeschlossene Luftmenge steht, wenn V_0 die Temperatur 0° und φ die Temperatur τ^0 hat, ist dann $p_0 = b \pm \delta$ [1]).

---

[1]) Reicht der Spiegelglasstreifen nicht bis hinter die Röhre bd, so liest man in a den Stand bei 0° x_0 und bei t^0 x_t ab und erhält dann den Druck $p_0 = (x_t - x_0)/t\alpha$, und $\pm \delta = p_0 - b$.

Uebung 3. Bestimmung der Spannungscoëfficienten.

1) Man setzt das Luftthermometer in das Gefäss zum Entwickeln des Wasserdampfes und erhitzt das Wasser bis zum Sieden.

2) Man schiebt den Schlitten in die Höhe, bis das Quecksilber in b die Spitze d berührt, hält das Wasser im Sieden, bis während etwa 5 bis 7 Minuten keine Verschiebung der Quecksilberkuppen mehr eintritt.

3) Man liest ab: a) die Differenz der Quecksilberkuppen in a und b, sie sei reducirt π_1; b) den Barometerstand, er sei reducirt b_1.

Der Druck p_1, unter dem das Gas im Luftthermometer steht, ist:

$$p_1 = \pi_1 + b_1 \pm \delta.$$

4) Man sucht in der Tabelle 12 die dem reducirten Barometerstande b_1 entsprechende Siedetemperatur T.

5) Man liest die Temperatur τ' an dem neben b hängenden Thermometer ab.

6) Nach Beendigung des Versuches schiebt man den Schlitten c wieder herab, weil sonst beim Entfernen des Siedegefässes das Quecksilber leicht nach n hinübertritt.

Berechnung. Hätte beim Füllen mit Luft bei 0^0 das ganze Luftvolumen bis zur Spitze die Temperatur 0^0, und nach dem Erhitzen die Temperatur T^0, würde man weiter die Ausdehnung des Glases nicht berücksichtigen, so wäre der Spannungscoëfficient

$$\alpha_1' = \frac{p_1 - p_0}{p_0 T}.$$

Macht man diese vereinfachenden Annahmen nicht, so ist

$$\alpha' = \frac{p_1(1 + \mu + 3\beta T) - p_0(1 + \mu)}{p_0 T + \mu(p_0[T - \tau'] - p_1[T - \tau'])}.$$

Uebung 4. Vergleichung eines Quecksilberthermometers mit dem Luftthermometer.

1) Man taucht das Quecksilberthermometer in das Bad neben das Luftthermometer und erwärmt. Dabei steigt das Quecksilber in der Röhre a und sinkt in b.

2) Man schiebt den Schlitten c in die Höhe, bis das Quecksilber in b die Spitze berührt, hält die Temperatur constant, bis während etwa 5 bis 7 Minuten keine Verschiebung der Quecksilberkuppen mehr eintritt.

3) Man liest ab a) die Temperatur τ und τ_1 des Bades bezw. der Luft bei b; b) die Differenz der Quecksilberkuppen in a und b, sie sei reducirt π_1; c) den Barometerstand, er sei reducirt b_1.

4) Man stellt denselben Versuch noch bei einigen anderen Temperaturen an und schiebt zuletzt c wieder nach unten.

Berechnung. Der Druck, den die im Luftthermometer abgeschlossene Luft bei der Temperatur des Bades ausübt, ist

$$p_{t_1} = \pi + b_1 \pm \delta.$$

Berücksichtigen wir nicht das Vorhandensein des Raumes φ und die Ausdehnung des Glases, so ist die wahre Temperatur des Bades

$$t_1 = \frac{p_{t_1} - p_0}{p_0 \cdot \alpha'}.$$

Die Abweichung des Quecksilberthermometers, welches t^0 zeigte, ist also $\Delta = t_1 - t$. Diese Correction ist bei allen Ablesungen am Quecksilberthermometer anzubringen.

Trägt man allen Correctionen Rechnung, so ist

$$t_1 = \frac{(p_{t_1} - p_0)(1 + \mu)}{p_0 \alpha' - p_t \cdot 3\beta}.$$

Beispiel: $q_1 = 204$, $b_1 = 736$, $\delta = + 2$, $p_{t_1} = 942$ mm. Ohne Rücksicht auf φ: $p_{t_1} - p_0 = 246{,}8$, $t_1 = 97{,}8^0$. Mit Rücksicht auf φ: $q/V_0 = {}^1/_{288}$, $\tau = 17{,}0^0$, $t_1 = 98{,}3^0$. Das gleichzeitig ins Wasserbad eintauchende Thermometer zeigte $98{,}5^0$, also um $0{,}2^0$ zu hoch.

Auf die durch das Luftthermometer bestimmten Temperaturen sind die Angaben aller anderen Thermometer zu beziehen. Dazu genügt es, ein Thermometer mit dem Luft- resp. Wasserstoffthermometer zu vergleichen, sich ein sogenanntes Normalthermometer herzustellen und dann mit diesem die zur Verwendung kommenden zu aichen (vergl. weiter unten bei Thermometrie). Solche Vergleichungen werden von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt an Thermometern, die ihr eingeschickt werden, ausgeführt.

Allgemeines.

1. Reduction eines eventuell feuchten Gasvolumens auf 0° C. und 760 mm (vergl. Tabelle 8).

Die Gesetze von Boyle und Charles dienen dazu, das Volumen zu berechnen, welches ein bei dem Druck p und der Temperatur t gemessenes Gasvolumen V_{pt} einnehmen würde, wenn es unter dem Drucke von 760 mm stände und die Temperatur 0^0 hätte.

Es ist, wenn $\alpha = 0{,}00367 = {}^1/_{273}$:

$$V_{760,0} = V_{pt} \cdot \frac{p}{760} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

Fangen wir ein Gas in einem Messcylinder über Quecksilber von der Temperatur t auf und ist das Niveau des letzteren im Messcylinder um h_t Millimeter höher als aussen, ist b_0 der reducirte Barometerstand und h_0 die auf 0^0 reducirte Quecksilbersäule h_t, so steht das Gas unter dem Druck $p = b_0 - h_0$.

Fangen wir das Gas über Wasser auf und ist das Niveau des letzteren um H Millimeter im Messcylinder höher als aussen, so müssen wir $b_0 = H/13{,}6$ von b_0 abziehen, und ferner dem Dampfdruck des Wasserdampfes (Tab. 13) Rechnung tragen.

In vielen Fällen ist auch das über Quecksilber gemessene Gas feucht, es enthält Wasserdampf, so bei Bestimmung von Wasserstoff im Eudiometer; wir bringen dann noch einen Tropfen Wasser dazu, um es mit Wasserdampf zu sättigen.

Ist V' das gemessene Volumen und e der Dampfdruck des Wasserdampfes bei der Temperatur t^0 (vgl. Hygrometrie), so ergiebt sich das Volumen des trockenen Gases folgendermaassen:

In einem Gemisch zweier Gase, das unter dem Drucke P das Volumen V' erfüllt, übt jede der beiden Componenten genau denselben Druck p bezw. p_1 aus, als ob sie allein den Raum V' erfüllte, wobei $p + p_1 = P$ ist (Gesetz von Dalton). Unter dem Drucke P würden die beiden Componenten also für sich Volumina ausfüllen:

$$V = V' \frac{P - p}{P} \qquad v = V' \frac{p}{P}.$$

In dem Gemisch von Luft und Wasserdampf, dessen Dampfdruck bei der Temperatur t gleich e ist, ist also ein Volumen

$$V = V' \frac{P - e}{P}$$

Luft enthalten. — Wir können demnach dem vorhandenen Wasserdampf dadurch Rechnung tragen, dass wir sagen, das Volumen V' steht unter dem gemessenen Druck P vermindert um die Spannkraft des Wasserdampfes bei t^0.

2. Kinetische Gastheorie.

Nach der kinetischen Gastheorie bestehen die Gase aus einzelnen Molecülen, die sich nach allen Richtungen durch einander bewegen, und deren Dimensionen klein gegenüber ihren gegenseitigen Abständen sind. Der Druck p auf die Wände eines Gefässes vom Volumen v, in dem eine bestimmte Masse eines Gases von der Temperatur t enthalten ist, wird durch die Stösse hervorgerufen, welche die Molecüle bei ihrem Auftreffen auf die Einheit der Wandfläche ausüben. Er hängt ab: 1) von der Zahl der Stösse, d. h. der Zahl der in der Zeiteinheit auftreffenden Molecüle; 2) von der Masse der stossenden Molecüle, und 3) von ihrer Geschwindigkeit U. Letztere hängt von der Temperatur ab. Würde beim Abkühlen eines Gases die Geschwindigkeit schliesslich gleich Null, so würde auch der Druck Null, wir sind bei der sogenannten absoluten Nulltemperatur angelangt. Aus der kinetischen Gastheorie leitet sich, wenn wir das Volumen der Gasmolecüle als verschwindend klein annehmen und voraussetzen, dass dieselben auf einander keine Kräfte ausüben, das Boyle-Charles'sche Gesetz ab, und zwar ist, wenn C eine von der Wahl der Einheiten für Druck und Volumen abhängige Constante ist:

$$p_0 v_0 (1 + \alpha t) = {}^1/_2 \, . \, C U^2 = \alpha p_0 v_0 \left(\frac{1}{\alpha} + t\right).$$

Der Druck auf die Wände wird Null, wenn $U = 0$, also

$$1 + \alpha t = 0, \qquad t = -1/\alpha = -273^0$$

ist. Die absolute Nulltemperatur liegt demnach bei -273^0 C. Die von -273^0 an gerechneten Temperaturen T heissen absolute Temperaturen; messen wir die Temperaturen in Celsiusgraden t, so ist die absolute Temperatur $T = t + 273^0$.

Ersetzt man die Temperatur in Celsiusgraden durch absolute Temperaturen, so erhält man für das Mariotte-Gay-Lussac'sche Gesetz:

$$p v = p_0 v_0 (1 + \alpha t) = \alpha p_0 v_0 \left(\frac{1}{\alpha} + t\right) = \alpha p_0 v_0 T = R T,$$

d. h. das Product aus Druck und Volumen ist proportional der absoluten Temperatur; R ist die sogenannte Gasconstante. Ihr Werth hängt von der Wahl der Einheiten ab. Misst man den Druck in Atmosphären, ist v_0 das specifische Volumen bei 0^0, d. h. das Volumen von 1 gr bei 0^0 (für Luft 773,276 cbcm), so wird für Luft

$$R_L = 29267.$$

Hieraus berechnet sich der Werth R_ϱ für irgend ein Gas, dessen Dichte auf Luft bezogen d ist, zu

$$R_\varrho = 29267/d.$$

Legt man die kinetische Gastheorie zu Grunde, so kann man aus dem Mariotte-Boyle'schen Gesetz, dem Gay-Lussac'schen Gesetz, den Abweichungen von denselben, aus den Coëfficienten der inneren Reibung und Wärmeleitung der Gase etc. unter anderem mit ziemlicher Genauigkeit berechnen: die Geschwindigkeit U der Molecüle eines Gases bei einer bestimmten Temperatur, die Moleculardurchmesser ϱ, die mittleren Weglängen L, d. h. diejenigen Strecken, welche im Mittel ein Molecül, ohne mit anderen zusammenzustossen, bei einer bestimmten Dichte, also einem bestimmten Druck zurücklegt. Es ergiebt sich z. B. bei 20^0 für [1])

	U	ϱ	L
Wasserstoff . . .	169 800 cm/sec.	$1{,}0 . 10^{-8}$ cm	$18{,}5 . 10^{-6}$ cm
Luft	44 700 „	$1{,}0 . 10^{-8}$ „	$9{,}5 . 10^{-6}$ „
Stickstoff . . .	45 300 „	$1{,}7 . 10^{-8}$ „	$9{,}8 . 10^{-6}$ „
Kohlensäure . .	36 100 „	$1{,}3 . 10^{-8}$ „	$6{,}8 . 10^{-6}$ „

[1]) Eine vollständige Zusammenstellung der auf die Gasmolecüle bezüglichen, sowie zahlreicher anderer für die Physik wichtiger Daten findet sich bei Landolt und Börnstein: Physikalische und chemische Tabellen.

VI. Dichte der Dämpfe und Gase.

Einleitung.

Definition. Die Dichte eines Dampfes (Gases), die Dampfdichte, wird, wenn sie zu Moleculargewichtsbestimmungen benutzt wird, definirt als das in der Volumeneinheit bei 0° und 760 mm Druck enthaltene Gewicht des Dampfes (Gases), verglichen mit dem bei 0° und 760 mm Druck in demselben Volumen enthaltenen Gewichte trockener atmosphärischer Luft.

Bei festen und flüssigen Körpern ist die Dichte in Folge des kleinen Ausdehnungscoëfficienten nur wenig von der Temperatur abhängig, und da die Compressibilität dieser Körper sehr klein ist, so gut wie gar nicht abhängig von dem äusseren Druck. Bei den Gasen und Dämpfen ändert sich dagegen die Dichte in hohem Grade sowohl mit dem Drucke wie mit der Temperatur. Daher müssen bei den Dichtebestimmungen der Gase entsprechende Reductionen vorgenommen werden [1]).

Wir betrachten im Folgenden die Dämpfe nur in solchen Zuständen, in denen sie hinreichend weit vom Sättigungspunkte entfernt sind, in denen sie sich also den Gasen analog verhalten (vergl. weiter unten unter „Unterschied von Gasen und Dämpfen").

Ein Volumen V_{pt} eines Gases stehe unter dem Druck p, habe die Temperatur t und das Gewicht G. Bei 0° und 760 mm Druck ist das Volumen derselben Gasmenge:

$$V_{760,0} = V_{pt} \frac{p}{760} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

Das Volumen Eins (1 cbcm) hat also bei 760 mm und 0° das Gewicht:

$$\gamma = \frac{G}{V_{760,0}} = \frac{G}{V_p{}^t} \cdot \frac{760}{p} \cdot (1 + \alpha t).$$

---

[1]) Denjenigen Praktikanten, welche noch nicht mit dem Volumenometer und dem Luftthermometer gearbeitet haben, wird deshalb empfohlen, vor der Bestimmung der Dampfdichte den vorhergehenden Abschnitt, namentlich die S. 84 behandelte Reduction eines Gasvolumens durchzulesen.

Das Volumen Eins (1 cbcm) von Luft hat bei 760 mm und 0° das Gewicht $\lambda = 0{,}00129$ gr, also ist das specifische Gewicht des Gases bezw. seine Dichte gegen die der Luft unter gleichen Bedingungen:

$$D_{760,0} = \frac{\gamma}{\lambda} = \frac{G}{0{,}00129} \frac{1}{V_{pt}} \frac{760}{p} (1 + \alpha t).$$

Avogadro hat den Satz aufgestellt:

Bei gleichem Druck und gleicher Temperatur enthalten gleiche Volumina aller Gase gleich viel Molecüle. Oder: Die Gewichte gleicher Volumina, also auch die Dichten δ_1, δ_2 zweier Gase, verhalten sich bei gleichem Drucke und gleicher Temperatur wie die Moleculargewichte.

Sind m_1 und m_2 die in Grammen ausgedrückten Gewichte der Molecüle zweier Stoffe 1 und 2, n die für beide Gase gleiche Anzahl derselben in der Volumeneinheit[1]), so sind die Gewichte der Volumeneinheit, d. h. die Dichten δ_1 und δ_2:

$$\delta_1 = n m_1 \qquad \delta_2 = n m_2,$$

also in der That:

$$\delta_1/\delta_2 = m_1/m_2 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 7)$$

Sind d_1 und d_2 die auf Luft bezogenen Dampfdichten zweier Substanzen, so ist $d_1 : d_2 = \delta_1 : \delta_2$, also auch

$$d_1/d_2 = m_1/m_2.$$

Durch eine Bestimmung des Verhältnisses der Dichten zweier Körper erhalten wir also das Verhältniss ihrer Moleculargewichte.

Setzen wir das Moleculargewicht des Wasserstoffs $m_2 = 2$, dessen Dichte $= d_2$, so erhalten wir:

$$d_1 : d_2 = m_1 : 2,$$

und hieraus für das Moleculargewicht m_1 irgend eines Gases:

$$m_1 = 2 \,.\, d_1/d_2.$$

Die Dichte des Wasserstoffs, bezogen auf Luft, ist $d_2 = 1/14{,}45$, also ist das Moleculargewicht eines Körpers von der auf Luft bezogenen Dichte d_1:

$$m_1 = 2 \,.\, 14{,}45\, d_1 = 28{,}9\, d_1.$$

Allgemeines über die Methoden. Will man die sogenannte normale Dampfdichte, wie sie zur Bestimmung des Moleculargewichts benutzt wird, erhalten, so muss der Dampf weit von seinem Sättigungspunkte (s. Hygrometrie) entfernt sein, d. h. er muss, wenn die Dampfdichte bei dem herrschenden Luftdruck ermittelt werden soll, über seinen Siedepunkt erhitzt oder er muss unter niedrigeren Druck gebracht werden. Dies ist deshalb nöthig, weil aus dem

---

[1]) Nach van der Waals sind bei Atmosphärendruck und bei 0° C. in 1 cbcm Gas $5 \,.\, 10^{19}$ Molecüle enthalten und das Gewicht von 1 Atom Wasserstoff würde etwa 10^{-24} gr betragen.

Volumen bei dem gerade vorhandenen Druck und seiner Temperatur nach dem Boyle-Charles'schen Gesetz das Volumen bei 0° und 760 mm berechnet wird, und dieses Gesetz für die Dämpfe nur dann gilt, wenn sie hinreichend weit von ihren Sättigungspunkten entfernt sind. Nach Regnault müssen Temperatur und Druck so gewählt werden, dass letzterer höchstens 0,8 von demjenigen beträgt, der bei der Versuchstemperatur eine Condensation hervorrufen würde. Die Dampfdichten ergeben sich um so grösser, je niedriger die Temperatur und je höher der Druck bei der Messung ist.

Die zur Dampfdichtebestimmung dienenden Methoden sind im Wesentlichen folgende:

1. Die Methoden, bei denen das Gewicht eines bestimmten Dampfvolumens ermittelt wird; Methode von Dumas.

2. Die Methoden, bei denen das Volumen des Dampfes, den ein bestimmtes Gewicht Flüssigkeit liefert, ermittelt wird; Methoden von Gay-Lussac und A. W. Hofmann.

3. Die Verdrängungsmethoden, bei denen das Volumen von Quecksilber oder einer leicht schmelzbaren Metalllegirung, oder aber das Luft-, Stickstoff- oder Wasserstoffvolumen bestimmt wird, welches der aus einer abgewogenen Flüssigkeitsmenge entwickelte Dampf verdrängt; Methode von Victor Meyer.

Von anderen Methoden, die sich auf verschiedene mit der Dichte zusammenhängende Eigenschaften der Gase gründen, behandeln wir nur eine von Bunsen angegebene.

1. Bestimmung der Dichte eines permanenten Gases.

Gebraucht wird: Glasballon von etwa $^1/_2$ Liter Inhalt mit zwei Glashähnen; Luftpumpe; Kipp'sche Apparate für Kohlensäure und Wasserstoff; Waschflaschen mit Wasser, concentrirter Schwefelsäure und einer Lösung von Kaliumpermanganat, Wasserbad; chemische Waage, Gewichte.

Princip. Die relativen Dichten der Gase werden dadurch bestimmt, dass man gleiche Volumina derselben wägt. Bestimmt man die Gewichte P_1, P_2, P_3 . . . gleicher Volumina verschiedener Gase bei derselben Temperatur und demselben Drucke, so verhalten sich die Dichten d_1, d_2, d_3 . . . wie die gefundenen Gewichte. Ist das erste Gas Luft, so sind die auf Luft bezogenen Dichten:

$$\Delta_2 = P_2/P_1, \qquad \Delta_3 = P_3/P_1 \ldots$$

also sind die auf Wasserstoff bezogenen Dichten:

$$\delta_2 = 14{,}45 \,.\, P_2/P_1, \qquad \delta_3 = 14{,}45 \,.\, P_3/P_1 \ldots$$

und die Moleculargewichte der Gase nach dem Avogadro'schen Gesetze

$$m_2 = 28{,}9\, P_2/P \quad \text{sowie} \quad m_3 = 28{,}9\, P_3/P_1 \quad \text{und} \quad m_2 : m_3 = P_2 : P_3.$$

Apparat. Die Gase werden in einem Glasballon von ca. $^1/_2$ Liter

Inhalt aus nicht gar zu dünnem Glase gewogen, an den oben und unten Glasröhren angeschmolzen sind. Die untere ist um den Ballon herum nach oben gebogen. Etwa 4 cm oberhalb des Ballons tragen beide Röhren Glashähne. Beim Füllen wird das Gas von oben oder unten in den Ballon eingeleitet, je nachdem es leichter oder schwerer als Luft ist, wobei der Ballon bis an die Hähne in ein Wasserbad von constanter Temperatur getaucht wird.

Uebung. 1) Man trocknet den Ballon, indem man ihn mit Alkohol und Aether ausspült und unter gelindem Erwärmen einen Strom getrockneter Luft hindurchsaugt.

2) Man taucht den Ballon längere Zeit in ein Wasserbad, während man langsam trockene Luft hindurchleitet, schliesst die Hähne, trocknet ihn ab, hängt ihn an einem dünnen Drahte an einer empfindlichen Waage auf und bestimmt sein Gewicht P_1'.

3) Man evacuirt den Ballon vollständig und bestimmt sein Gewicht P.

4) Man leitet durch den Ballon trockene Kohlensäure und wägt; Gewicht P_2'.

5) Dasselbe führt man mit Wasserstoff aus; Gewicht P_3'.

Dann sind $P_1 = P_1' - P$, $P_2 = P_2' - P$, $P_3 = P_3' - P$ die Gewichte gleicher Volumina von Luft, Kohlensäure und Wasserstoff.

Beispiel: $P_1' = 71{,}247$; $P = 70{,}604$; $P_2' = 71{,}588$; $P_3' = 70{,}649$; $P_1 = 0{,}643$; $P_2 = 0{,}984$; $P_3 = 0{,}045$; $\varDelta_2 = 1{,}531$; $\varDelta_3 = 1/14{,}3$; $m_2 = 44$; $m_3 = 2$. In der That ist $P_2 : P_3 = 22 : 1$.

2. Methode von Dumas.

Gebraucht werden: Glasballons von ca. $^1/_8$ Liter Inhalt, Fig. 52, *A*; Drahtdreifuss Fig. 51; alkohol- und wasserfreier (über Natrium stehender) Aethyläther, Methyl-, Aethylacetat; Stativ Fig. 52 mit Thermometer, Rührer, grösserer Topf, Dreifuss und Brenner; Löthrohr mit Gaszufluss; Gefäss mit ausgekochtem Wasser; feinere und gröbere Waage mit entsprechenden Gewichtssätzen.

Princip. In einem Ballon wird eine solche Menge der zu untersuchenden Substanz verdampft, dass derselbe von den Dämpfen derselben erfüllt ist, aber auch keine Flüssigkeit mehr vorhanden ist, und dann der Ballon verschlossen. Durch Wägungen wird die in dem Ballon enthaltene Dampfmenge ermittelt, wobei dem Gewichte der von dem Ballon verdrängten Luft Rechnung zu tragen ist und daraus die Dampfmenge Π' bestimmt, die in dem Ballon bei 0^0 und 760 mm enthalten sein würde. Das Volumen V des Ballons wird durch Auswägen mit Wasser oder Quecksilber bestimmt. Dann ist:

$$\varDelta = 1/0{,}00129 \,.\, \Pi'/V.$$

Uebung. 1) Man trocknet einen Glasballon *A*, Fig. 52, von circa $^1/_8$ Liter Inhalt, an den eine Glasröhre *bd* angesetzt ist, und

lässt diese gegen das Ende hin, etwa bei *c*, durch vorsichtiges Erwärmen vor der Gebläselampe etwas zusammenfallen.

2) Man wägt den Ballon auf einer feinen Waage, sein Gewicht sei *P*.

Dabei stellt man denselben auf einen Drahtdreifuss (Fig. 51).

3) Man bringt in den Ballon einige Gramm der Flüssigkeit, deren Dampfdichte bestimmt werden soll. Dazu erwärmt man den Ballon etwas und taucht dann *d* in die Flüssigkeit. Beim Abkühlen tritt die Flüssigkeit in den Ballon hinein. Ist das Rohr *c* nicht zu eng, so kann man auch die Flüssigkeit in *d* hineingiessen und durch Schütteln nach *A* bringen.

4) Man befestigt den Ballon, sowie ein Thermometer *T* an einem Stativ (Fig. 52) und setzt dieses und den Rührer *r* in einen eisernen Topf, der mit Wasser gefüllt ist, so ein, dass die Stelle *c* sich gerade oberhalb des Wassers befindet. — Für höher siedende Substanzen muss man zum Erhitzen andere Substanzen (wie Oel etc.) anwenden [1]).

5) Das Bad erhitzt man auf eine Temperatur, die etwa 10° höher

Fig. 51.

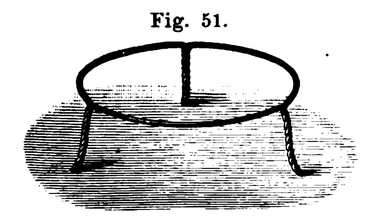
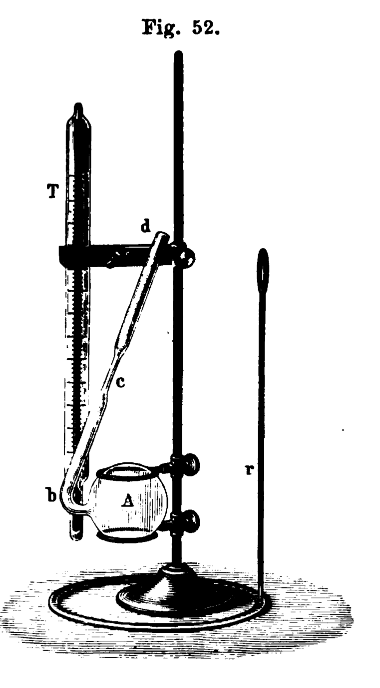


Fig. 52.



liegt, als der Siedepunkt der Substanz in *A* bei dem herrschenden Drucke, also bei Aether auf etwa 45°. Nachdem alle Substanz verdampft ist, schmilzt man, während *A* noch im Bade ist, mit einer Stichflamme [2]), am besten mit derjenigen eines Löthrohres mit Gaszufuhr oder der Flamme eines kurzen, zu einer Spitze ausgezogenen, an den Gasschlauch gesteckten Glasröhrchens, bei *c* zu und zieht das

---

[1]) Man kann auch den Ballon in einem Dampfmantel erhitzen, vergl. Seite 81.

[2]) Man kann den Ballon auch von vornherein bei *c* zu einer feinen Spitze ausziehen und dieselbe nachher zuschmelzen; in diesem Falle lässt man etwas unterhalb der Oeffnung die Spitze vor einer sehr spitzen Löthrohrflamme zufallen, damit bei leicht entzündbaren Dämpfen diese sich nicht entzünden.

Stück cd ab, welches man aufbewahrt. Man liest die Temperatur t des Bades und den Barometerstand b ab.

Ob alle Substanz verdampft ist, erkennt man am besten, wenn man oberhalb des Wasserbades eine Gasflamme anzündet und beobachtet, ob das in dem Flüssigkeitstropfen an dem Boden des Ballons sichtbare kleine Bild der Flamme verschwunden ist.

6) Man trocknet den abgekühlten Ballon ab und wägt ihn mit der Spitze cd zusammen auf einer feinen Waage, während man gleichzeitig den Barometerstand b' und die Temperatur t' im Waagekasten bestimmt. Das Gewicht sei P'.

7) Man feilt die Spitze des Ballons unter ausgekochtem, luftfreiem, kaltem Wasser an und bricht sie ab; das Wasser strömt in den Ballon; bleibt dabei etwas Luft im Ballon, so senkt man ihn so weit in das Wasser ein, bis dasselbe innerhalb und ausserhalb gleich hoch steht, hält die Oeffnung des Ballons mit dem Finger zu und hebt ihn aus dem Wasser heraus. Dabei dreht man ihn so, dass die Oeffnung nach oben steht.

8) Der gefüllte Ballon nebst der abgebrochenen Spitze wird wieder gewogen und zwar auf einer gröberen Waage. Das Gewicht sei P''.

9) Ist nicht alle Luft durch den Dampf ausgetrieben, so wird zunächst der nur theilweise mit Wasser gefüllte Ballon gewogen. Dann füllt man ihn vollständig mit Wasser und bestimmt von Neuem sein Gewicht; eine hiervon herrührende Correction vernachlässigen wir zunächst.

Berechnung: Um aus den gefundenen Werthen die Dichte des Dampfes zu erhalten, müssen wir das Volumen des Ballons und das Gewicht des Dampfes in demselben bei 0^0 und 760 mm berechnen.

Wir vernachlässigen dabei die Ausdehnung des Glases und des Wassers bei der Temperaturerhöhung und nehmen an, dass der Barometerstand b sich während des Versuches nicht geändert und der Ballon sich ganz mit Wasser gefüllt habe.

Da ein Körper in einem Gase gerade ebenso, wie in einer Flüssigkeit, einen Auftrieb (S. 64) erfährt, so ist das Gewicht P des leeren Ballons gleich dem Gewicht der Glashülle des Ballons B plus dem Gewichte der darin enthaltenen Luft l weniger dem Gewicht der vom Ballon mit der Luft darin verdrängten äusseren Luft λ; da die Glashülle sehr dünn ist, so ist l nahezu $= \lambda$ und P giebt das Gewicht der Glashülle selbst. Das Gewicht P'' ist das Gewicht des mit Wasser gefüllten Ballons weniger dem Gewicht der von Ballon und Wasser verdrängten Luft. Da die Dichte der Luft nur circa $^1/_{773}$ von derjenigen des Wassers ist, so erfährt der Ballon mit dem Wasser nur einen Gewichtsverlust von $^1/_{773}$ seines eigenen Gewichtes. Wir vernachlässigen diesen Gewichtsverlust, dann ist P'' das Gewicht des mit Wasser gefüllten Ballons. Das Volumen des Ballons ist:

$$V = (P'' - P) \text{ cbcm.}$$

Das Gewicht P' ist gleich dem Gewicht des leeren Ballons P plus dem Gewicht des darin enthaltenen Dampfes Π weniger dem Gewicht der verdrängten Luft P, es ist:

$$P' = P + \Pi - P_1, \quad \text{oder.} \quad \Pi = P' - P + P_1.$$

Da das Gewicht der verdrängten Luft von derselben Grössenordnung ist, wie das Gewicht des Dampfes selbst, so können wir das erstere hier nicht mehr vernachlässigen.

1 cbcm Luft wiegt bei 0° und 760 mm 0,00129 gr, also wiegt er bei t'^0 und b' mm Druck, die während der zweiten Wägung herrschten:

$$P'_1 = \frac{0{,}00129}{1 + 0{,}00367\,t'} \frac{b'}{760}.$$

Das Gewicht der von dem Ballon, d. h. von V cbcm verdrängten Luft ist danach $P_1 = P'_1\,V$.

Die Dampfmenge Π ist in dem Ballon bei der Temperatur des Zuschmelzens t und dem Drucke b enthalten; würde dasselbe Volumen V von Dampf bei 0° und 760 mm erfüllt sein, so wäre sein Gewicht:

$$\Pi' = \Pi \,.\, (1 + 0{,}00367\,t) \,.\, 760/b.$$

In einem Cubikcentimeter würden enthalten sein: Π'/V.

Da aber ein Cubikcentimeter Luft von 0° und 760 mm Druck 0,00129 gr wiegt, so ist die auf Luft bezogene Dichte Δ und das Moleculargewicht M:

$$\Delta = \frac{1}{0{,}00129} \frac{\Pi'}{V} \quad \text{und} \quad M = 28{,}9\,\Delta.$$

Für genaue Bestimmungen müssen wir folgende Formel anwenden; wir wählen, um Verwechselungen vorzubeugen, andere Buchstaben.

Es sei m das Gewicht des mit Luft gefüllten Ballons, m' das Gewicht des mit Dampf gefüllten Ballons, M' das Gewicht des theilweise mit Wasser gefüllten Ballons, M das Gewicht des ganz mit Wasser gefüllten Ballons, t und b Temperatur des Dampfes und Barometerstand im Augenblick des Zuschmelzens, t' und b' Temperatur im Waagekasten und Barometerstand bei der Wägung mit Dampf (ist e die Spannkraft des Wasserdampfes im Waagezimmer, so ist $^3/_8\,e$ von b' abzuziehen), λ' die Dichte der Luft, wie sie t' und b' entspricht, Q die Dichte des zur Wägung angewandten Wassers, $3\,\beta$ der cubische Ausdehnungscoëfficient des Glases, der etwa $^1/_{40\,000}$ beträgt. Man erhält dann die Dichte d_0:

$$d_0 = \frac{(m' - m)\,\frac{Q}{\lambda'} + (M' - m')}{(M - m)\,\frac{b}{b'}\,\frac{1 + 0{,}00367\,t'}{1 + 0{,}00367\,t}\,[1 + 3\,\beta\,(t - t')] - (M - M')}.$$

In erster Annäherung können wir das Glied mit $3\,\beta\,(t - t')$ vernachlässigen. Eine genügende Annäherung giebt die folgende Formel

$$d_{,} = \left(\frac{m' - m}{M - m}\frac{1}{\lambda'} + 1\right)\frac{b'}{b}\frac{1 + 0{,}00367\,t}{1 + 0{,}00367\,t'}.$$

Beispiel: Aethyläther ($C_4H_{10}O$). Gefunden wurde: $P = 25{,}615$ gr; $t = 47^0$; $b = 749$ mm (schon reducirt siehe S. 27). $P' = 25{,}8052$; $t' = 20^0$; $b' = 749$ mm. $P'' = 136$ gr.

Berechnung: $V = 110{,}4$ cbcm; $P_1' = \frac{0{,}00129}{1 + 0{,}00367 \,.\, 20}\,\frac{749}{760} = 0{,}001185$; $P_1 = 0{,}001185 \times 110{,}4 = 0{,}131$ gr. $\Pi = 0{,}190 + 0{,}131 = 0{,}321$ gr; $\Pi' = 0{,}321$ $760/749 \,.\, (1 + 0{,}00367 \,.\, 47) = 0{,}382$ gr. In 1 cbcm würden enthalten sein: $0{,}382/110{,}4 = 0{,}00346$ gr. Die auf Luft bezogene Dichte ist $\varDelta = 2{,}68$. Das Moleculargewicht bestimmt sich hieraus zu $M = 77$. In Wirklichkeit ist es gleich 74.

3. Methode von Gay-Lussac-Hofmann.

Gebraucht wird: Barometerrohr mit Dampfmantel, Fig. 53; längeres Rohr zum Luftaussaugen beim Trocknen; Quecksilber, Porcellanschälchen und Waage zum Calibriren; Quecksilberwanne im Quecksilberkasten; Fläschchen mit Glasstopfen; Messingfuss (Fig. 54); Chloroform (über Chlorcalcium); feinere Waage; Dampfkessel *K* (Fig. 53); Kühlschlange; Kathetometer *M* (Fig. 53).

Die Dumas'sche Methode ist in ihrer einfachsten Form bei allen denjenigen Substanzen nicht anwendbar, welche sich beim Erhitzen schon unterhalb ihres Siedepunktes bei Atmosphärendruck zersetzen. Viele Körper lassen sich aber bei niedrigeren Drucken unzersetzt verflüchtigen. Dieses Verhalten wird bei der folgenden Methode benutzt.

Princip. Man lässt eine abgewogene Menge Flüssigkeit G in das Torricelli'sche Vacuum eines Barometerrohres steigen, das nachher durch einen Dampfmantel auf eine constante Temperatur t erhitzt wird. Die Flüssigkeit verdampft und nimmt als Dampf ein Volumen von V cbcm ein, der Dampf steht unter dem Drucke des Barometerstandes b weniger dem auf 0^0 reducirten (S. 27) Druck h der Quecksilbersäule in dem Barometerrohre. Das Volumen würde also bei 0^0 und 760 mm sein:

$$V_{760,0} = V\,\frac{(b - h)}{760}\,\frac{1}{(1 + \alpha t)}\ \text{cbcm}.$$

Bei 0^0 und 760 mm würde also ein Cubikcentimeter wiegen $G/V_{760,0}$ gr; die auf Luft bezogene Dichte und das Moleculargewicht sind demnach:

$$\varDelta = \frac{G}{0{,}00129\,V_{760,0}} \quad \text{und} \quad M = 28{,}9 \,.\, \varDelta.$$

Apparat (Fig. 53). Ein durchweg gleich weites, oder besser ein oben erweitertes, über 760 mm langes, mit Quecksilber gefülltes Rohr $r\,r'$ taucht mit seinem unteren Ende r' in eine Quecksilberwanne W. Das Rohr r' ist von einem weiten Glasrohr RR umgeben, das unten durch einen Kork verschlossen ist, durch welchen das Rohr $r\,r'$ hindurchgeht. An dem unteren Ende von RR ist ein seitliches Rohr a

angesetzt, das zu einer Kühlvorrichtung *C* führt. Das obere Ende von *RR* ist durch einen Kautschukschlauch mit dem Rohr *z* verbunden, welches zu einem Kessel *K* führt. In diesem werden Flüssigkeiten (z. B. Wasser, SP. = 100°, Anilin, SP. = 182°) zum Sieden erhitzt, deren Dämpfe dann *z*, *RR*, *a* und *C* durchströmen und in *F* gesammelt werden.

Zum Einbringen der Flüssigkeiten dienen kleine, mit Glasstopfen versehene längliche Fläschchen, Fig. 54, deren Durchmesser kleiner als die lichte Weite des Rohres *rr'* ist; sie werden in passenden Messingfüsschen (Fig. 54) gewogen. Man wählt die Grösse der Fläschchen so, dass die Quantität, die man verwenden will, sie fast ganz ausfüllt. Sollten die Fläschchen grösser sein, so füllt man sie zum Theil mit Quecksilber.

Fig. 53.



Fig. 54.



Zum Messen der Höhe der Quecksilbersäule in dem Rohre *rr'* dient entweder ein Kathetometer oder die Vorrichtung *S*. Dieselbe besteht aus einer frei vertical herabhängenden Stange *S* mit einer schwalbenschwanzartigen Nuthe, in der man eine mit einer Millimeterscala versehene zweite Stange auf- und abschrauben kann (durch die am unteren Ende in der Fig. 53 sichtbare Schraube). Diese innere Stange trägt unten eine Spitze, welche den Nullpunkt der Scala bezeichnet und die auf das Quecksilber in der Wanne *W* eingestellt wird. An der Stange *S* kann durch Drehen an der Schraube *M* ein Arm auf und ab bewegt werden, welcher eine Ablesevorrichtung trägt. Dieselbe besteht meist aus einem einfachen Diopter, zwei Drähten, welche horizontal über zwei vertical stehende Ringe gespannt sind. Der obere Rand der Fassung von *M* misst die Höhe *h* der Quecksilbersäule auf der Scala.

Uebung 1. Calibriren des Barometerrohres *rr'*. Ist das Rohr *rr'*, wie in Fig. 53, getheilt, so muss der Volumenwerth eines Scalentheiles α ermittelt werden, resp. wenn die Theilung schon die

Cubikcentimeter anzeigt, diese Theilung durch Auswägen mit Quecksilber geprüft werden.

Hat das Rohr keine Theilung, so verfährt man, sowohl wenn es überall gleich weit ist, als auch, wenn es, wie in Fig. 55, sich oben erweitert, was sich zur Aufnahme grösserer Dampfmengen bei Verbindungen mit niedrigem Moleculargewicht empfiehlt, folgendermaassen:

1) Man reinigt und trocknet das Rohr. Dazu spült man es mit Wasser, Alkohol und Aether aus, führt in dasselbe ein langes Messingrohr ein, welches man mit der Saugpumpe verbindet und saugt unter gleichzeitigem Erwärmen Luft hindurch.

2) Man füllt das ganze Rohr mit Quecksilber, schliesst es bei r' mit dem Finger und kehrt es in einer Quecksilberwanne um; dann bildet sich oben das Torricelli'sche Vacuum, in das aber namentlich beim Neigen des Rohres noch einige an den Wänden haftende Luftblasen treten.

3) Man neigt das Rohr, so dass das Quecksilber sich oben anlegt, schliesst bei r', hebt es aus der Quecksilberwanne und kehrt es um: die Luftblase wandert nach oben.

4) Man füllt nun noch Quecksilber auf, bis das Rohr ganz gefüllt ist, und entleert es in eine Flasche.

5) Man bestimmt das Gewicht P_2 von Flasche und Quecksilber, dann das der Flasche allein: P_1; das Gewicht des Quecksilbers ist $P = P_2 - P_1$.

Dann ist $V = P/D$ das Volumen des ganzen Rohres (D Dichte des Quecksilbers bei Zimmertemperatur, vergl. Tabelle 6.

6) Man füllt den oberen Theil rc mit Quecksilber, entfernt die Luftblasen durch Hin- und Herfliessenlassen des Quecksilbers und bestimmt das Gewicht p der den erweiterten Theil bis zur Stelle c füllenden Quecksilbermenge. Dann ist das Volumen des oberen Theiles $v_0 = p/D$. Das Volumen des cylindrischen Theiles cr' ist $v_c = (P - p)/D$.

7) Man misst die Länge L des cylindrischen Stückes cr' : L mm. Einem Millimeter der Rohrlänge entspricht das Volumen $\varphi = v_c L$ cbcm.

Reicht also eine Quecksilbersäule $r'b$ bis b und ist $cb = l$ mm, so ist oberhalb derselben das Volumen $(v_0 + \varphi l)$ cbcm abgeschlossen.

Uebung 2. Bestimmung der Dampfdichte. 1) Das Rohr rr' wird mit Quecksilber gefüllt; die Luftblasen werden wie oben bei 1) bis 3) entfernt, und das Rohr wird dann in der Quecksilberwanne W umgekehrt. Das Quecksilber sinkt bis auf die Höhe des augenblicklichen Barometerstandes herab, oberhalb entsteht das Torricelli'sche Vacuum.

2) Man schiebt den Mantel RR über das Rohr rr' und drückt ihn über den über rr' geschobenen Kautschukstopfen bei r'.

3) In dem Fläschchen, Fig. 54, wägt man eine Menge G der zu untersuchenden Substanz ab, wobei der Stöpsel nur ganz lose aufgesetzt wird.

4) Man neigt das Rohr rr' mit seinem Mantel RR so weit, dass

das Quecksilber sich an das obere Ende desselben anlegt, und führt das Fläschchen durch das Quecksilber in der Wanne W hindurch von unten in das Rohr rr' ein.

Das Fläschchen steigt in die Höhe. Noch ehe es das Rohrende erreicht, verdampft oft ein Theil der Flüssigkeit; die Dämpfe treiben dann das Quecksilber herab.

5) Man stellt den Dampfmantel RR mit dem Rohre rr' wieder vertical und befestigt ihn in seinem Stativ, so dass der untere Rand des Rohres rr' einige Millimeter vom Boden der Wanne entfernt ist. Dann verbindet man durch die Röhre z das obere Ende von R mit dem Kessel K, in dem man eine Flüssigkeit verdampft, deren Siedepunkt t höher liegt als derjenige der zu untersuchenden Substanz bei dem im Rohre rr' nach der Vollendung der Dampfentwickelung vorhandenen Druck. Der durch RR streichende Dampf bringt die in rr' enthaltene Substanz vollständig zum Verdampfen und die Temperatur des Dampfes auf t^0. Das Anheizen muss langsam und vorsichtig erfolgen. Der am unteren Ende von RR austretende Dampf wird durch das Rohr a und die in C enthaltene Kühlvorrichtung geleitet und dadurch condensirt; in F fängt man die gebrauchte Flüssigkeit wieder auf. Man erhitzt so lange, bis der Stand der Quecksilberkuppe sich nicht mehr ändert.

Fig. 55.

6) Man stellt zur Messung der Höhe der Quecksilbersäule die Vorrichtung M neben den Apparat, und stellt die untere Spitze derselben auf die Quecksilberoberfläche ein, was sehr genau geschehen kann, da bei einem Schweben derselben über dem Quecksilber ihr Spiegelbild in demselben deutlich und scharf erscheint, beim Eintauchen aber die Quecksilberoberfläche deformirt wird.

7) Man verschiebt den Schieber M mit seiner Ablesevorrichtung so lange auf dem Stabe, bis diese auf die Quecksilberkuppe eingestellt ist, und liest ihre Höhe h_1, sowie den Barometerstand b ab.

8) Man verschiebt, wenn man das Rohr Fig. 55 verwendet, den Schieber M von der Kuppe, die bei b stehen möge, nach oben und stellt auf c ein: Höhe h_2; bei einem überall gleich weiten, ungetheilten Rohre stellt man auf das obere Ende r desselben ein: Höhe h_3.

9) Man misst die Höhe h_4 des die Röhre R unten verschliessenden Stopfens über dem Quecksilber in der Wanne.

10) Man liest die Temperatur τ an einem in der Nähe des unteren Endes von r' befindlichen Thermometer ab.

Berechnung. Ist das Rohr rr' getheilt, so liest man das Volumen V direct ab und corrigirt es auf Grund einer durch die Calibrirung erhaltenen Correctionstabelle.

Ist das Rohr nicht getheilt, aber überall gleich weit, so erhält man unmittelbar das der Länge $h_3 - h_1$ entsprechende Volumen. Hat es die Gestalt Fig. 55, so ist das über b im cylindrischen Theile abgeschlossene Volumen bc gleich $\varphi\,(h_2 - h_1)$, das ganze vom Dampf eingenommene Volumen also $V = v_0 + \varphi\,(h_2 - h_1)$ cbcm.

Der Druck der Quecksilbersäule h in der Gleichung S. 94 setzt sich aus den auf 0^0 reducirten Längen der in den Dampfmantel hineinragenden Länge $h_1 - h_4$, d. h. $(h_1 - h_4)/(1 + 0{,}000181\,t)$ und der ausserhalb des Dampfmantels befindlichen h_4, d. h. $h_4/(1 + 0{,}000181\,\tau)$ zusammen, so dass $h = (h_1 - h_4)/(1 + 0{,}000181\,t) + h_4/(1 + 0{,}000181\,\tau)$.

Diesen Werth von h setzt man in die Formel S. 94 ein.

Beispiel: $V = 109{,}5$, $v_0 = 72{,}6$, $v_c = 36{,}9$ cbcm; $L = 605$ mm, $\varphi = 0{,}061$ cbcm; $G = 0{,}198$ gr; $CHCl_3$ (= 120); $h_2 = 605$ mm; $h_1 = 320$ mm; $b = 744$ mm; $t = 100^0$; $V = 72{,}6 + (605 - 320) \cdot 0{,}061 = 90{,}0$ cbcm; $V_{760,0} = 36{,}7$; $\Delta = 4{,}18$; $M = 121$.

4. Methode von Victor Meyer.

Gebraucht wird: Apparat Fig. 56 mit Dampfmantel, Messcylinder und Thermometer; Brenner mit Schlauch; Röhrchen mit Kappe und Messingfuss; längeres Messingrohr zum Luftaussaugen beim Trocknen, Glas- oder Asbestwolle; feine Waage mit Gewichtssatz; Chloroform (wasser- und alkoholfrei).

Princip. Ein mit Luft gefüllter Cylinder A befindet sich in einem Raume C von constanter Temperatur T, und ist oben durch einen Kork verschlossen; ein umgebogenes Glasrohr a führt zu einem Messcylinder m, dessen Temperatur t ist. Bringt man in A eine abgewogene Flüssigkeitsmenge G, deren Siedepunkt niedriger als T ist, so verdampft sie und verdrängt ein Volumen Luft von der Temperatur T, das dem Volumen des aus ihr entstehenden Dampfes gleich ist. Diese Luft wird in dem Messcylinder bei der Temperatur t aufgefangen; sie stehe unter dem Drucke β, ihr Volumen sei V. Die Luft hat bei dem Uebergang aus A nach m eine Volumverminderung entsprechend der Temperaturerniedrigung von T bis t erfahren. Eine gleiche Volumänderung würde aber auch der Dampf der Flüssigkeit erlitten haben, wenn er ohne Condensation auf die Temperatur t gebracht werden könnte, da die Ausdehnungscoëfficienten aller Gase und Dämpfe einander gleich sind. Dasselbe gilt auch für die Volumänderungen in Folge der Druckänderungen. Nimmt aber das Gewicht G der Flüssigkeit im Dampfzustande bei t^0 und unter dem Drucke β ein Volumen V ein, so würde es bei der Temperatur 0^0 und dem Drucke 760 mm ein Volumen einnehmen:

$$V_1 = \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{\beta}{760}.$$

Das Gewicht eines Cubikcentimeters ist also: $\Pi = G/V_1$.

Die auf Luft bezogene Dichte und das Moleculargewicht sind demnach $\Delta = \Pi/0{,}00129$ und $M = 28{,}9\,\Delta$.

Apparat. Ein Glascylinder C (Fig. 56) ist unten geschlossen oder in einen eisernen, oben mit einer Rinne versehenen Tiegel T mit Gyps eingekittet. Ein Ring r trägt den Tiegel, ein anderer r_1 hält den Glascylinder in verticaler Richtung. Der untere Theil des Apparates wird mit Wasser gefüllt. In dem Cylinder hängt von oben, gehalten von einem in der Mitte durchgeschnittenen, mit einem Abzugsrohr mit Schlauch für die Dämpfe versehenen Kork, der folgende Apparat. An ein cylindrisches Glasgefäss A von circa 100 cbcm Inhalt und etwa 200 mm Höhe ist ein etwa 600 mm langes und 6 mm weites Glasrohr b angeschmolzen, das oben in einer Erweiterung d endigt und durch einen Kautschukstopfen k verschlossen ist. Etwa in der Höhe von 500 mm ist seitlich ein enges, nach unten umgebogenes Rohr a angesetzt, dessen Ende in einem mit Wasser gefüllten Gefäss w unter einem Messcylinder m mündet; das Rohr a ist zweckmässig in dem nach unten gehenden Theile zu einer Kugel erweitert, um bei einer etwaigen Abkühlung von A ein sofortiges Eindringen von Wasser in A möglichst zu verhindern. Gegenüber dem Rohre a ist ein engeres Rohr e angesetzt, in dem, durch einen Kautschukschlauch luftdicht festgehalten, der Kupferstab g hin und her bewegt werden kann.

Fig. 56.



Fig. 56 a.

Die Substanz wird in einem kleinen, unten zugeschmolzenen und zu einer feinen Glasspitze ausgezogenen cylindrischen Röhrchen abgewogen, welches in einem kleinen Messingfusse, wie ihn die Fig. 54 zeigt, auf die Waage gestellt wird. Damit so wenig wie möglich von der Flüssigkeit während der Wägung durch Verdunsten verloren geht, wird auf das Röhrchen mittelst eines kurzen Stückes Gummischlauch ein anderes, zugeschmolzenes Röhrchen gesteckt.

Für flüchtige Substanzen nimmt man Sprengkügelchen k (Fig. 56 a) von sehr dünnem Glase, die man zur Füllung in ein Glasrohr mit Kork einsetzt, welches mit der Flüssigkeit f gefüllt ist; durch Erwärmen

treibt man die Luft aus *k*; beim Abkühlen wird Flüssigkeit eingesogen. Wenn das Kügelchen gefüllt ist, schmilzt man bei *h* ab.

Uebung. 1) Man trocknet das Rohr *A*, indem man nach Ausspülen mit Alkohol und Aether und nach Abnehmen des Stopfens *k* und des Gummischlauches bei *e* ein langes Messingrohr bis an das Ende von *A* einführt, welches mit der Saugpumpe in Verbindung steht. Unter vorsichtigem Erwärmen des Glasrohres zieht man das Messingrohr allmählich aus demselben wieder heraus. Hierauf schiebt man einen Bausch trockener Glas- oder Asbestwolle durch das Glasrohr *b* nach *A* [1]), setzt den Stopfen *k* auf und befestigt das Rohr *A* in *C*, und zwar so, dass die Kugel im Rohre *a* über der Wasseroberfläche steht.

2) a) Man wiegt die Röhrchen resp. Sprengkügelchen leer, Gewicht *P*, und b) mit der Flüssigkeit, Gewicht P', von der man so viel nimmt, dass etwa 50 cbcm Dampf aus ihr bei der Temperatur *T* entstehen (bei Chloroform etwa 0,20 gr für $T = 100^0$).

3) Man erhitzt die Flüssigkeit in *T*, bis der ganze Apparat auf eine constante Temperatur gekommen ist; man erkennt dies daran, dass keine Luftblasen mehr aus *a* entweichen.

4) Man zieht den Stöpsel *k* heraus und lässt das Röhrchen, nachdem man die Gummikappe abgezogen, resp. das Sprengkügelchen mit der Substanz vorsichtig in das Rohr gleiten; es bleibt auf dem Kupferstabe hängen. Man setzt den Kautschukstöpsel rasch wieder auf.

Hierbei wird die Luft verdünnt, ausserdem wird die warme Luft im Inneren durch eindringende kalte des Zimmers etwas abgekühlt und zieht sich zusammen. Das Wasser kann, falls die Kugel an *a* zu klein ist, in den Apparat hineingesaugt werden. Um dies zu vermeiden, muss man das Oeffnen und Schliessen von *d* möglichst rasch vornehmen, eventuell durch Wiederöffnen von *k* die in die Höhe gezogene Flüssigkeit wieder herabsinken lassen.

5) Man schiebt den mit Wasser gefüllten Messcylinder *m* über *w*.

6) Man zieht den Kupferstab zurück und lässt das Eimerchen resp. Kügelchen nach unten fallen. Die in ihm enthaltene Flüssigkeit verdampft und aus *a* steigen Luftblasen in die Höhe.

7) Man wartet so lange, bis keine Blasen mehr in dem Messcylinder emporsteigen, und ermittelt:

a) den reducirten Barometerstand *b*, b) die Höhe *H* der Wassersäule in *m* und reducirt dieselbe auf Quecksilberdruck $h = H/13,6$, c) die Temperatur *t* des Wassers in *w*, d) das Volumen V' des Gases in dem Messcylinder.

---

[1]) Hat das die Substanz enthaltende Cylinderchen einen ausgezogenen federnden Fuss, so kann man den Bausch, der oft Feuchtigkeit und Verunreinigungen in das Rohr hineinbringt, weglassen, ohne befürchten zu müssen, dass das Glas beim Auffallen den Boden zerschlägt. Auch bei Anwendung der Sprengkügelchen lässt man die Glas- oder Asbestwolle fort.

Nach Beendigung des Versuches nimmt man den Stopfen k ab, ehe man den Brenner unter dem Apparate, Fig. 56, entfernt.

Berechnung. In der obigen Gleichung (S. 98) sind durch die Messungen direct gegeben das Gewicht $G = P' - P$, die Temperatur t. Das gemessene Volumen V' setzt sich zusammen aus dem Volumen V der aus dem Erhitzungsapparat durch den Dampf verdrängten Luft, und einem bestimmten Volumen Wasserdampf von dem Dampfdruck e bei t^0 (vergl. Hygrometrie).

Das Volumen der verdrängten Luft ist bei 0^0 und 760 mm, da in der Gleichung S. 85 $P = b - h$ ist:

$$V_{0,760} = \frac{V'}{1 + \alpha t} \cdot \frac{b - h - e}{b - h} \cdot \frac{b - h}{760} = \frac{V'}{1 + \alpha t} \cdot \frac{b - h - e}{760}.$$

Beispiel. Chloroform ($CHCl_3 = 120$); $G = 0{,}154$ gr; $V = 32{,}6$ cbcm; $H = 267$ mm; $t = 18{,}5^0$; $b = 746$ mm; $e = 16$ mm; $b - h - e = 710$ mm; $V_{760,0} = 28{,}5$; $G/V = 0{,}0054$; $\Delta = 4{,}15$; $M = 120$.

5. Methode von Bunsen, Ausfluss durch enge Oeffnungen.

Gebraucht wird: Röhre mit feiner Oeffnung am unteren Ende (Fig. 57); Stativ; Quecksilberkasten; Wasser; Quecksilber; Chronoskop. — Bunsen'sches Effusiometer (Fig. 58); Kipp'sche Apparate für Kohlensäure und Wasserstoff, Wasch- und Trockenflaschen.

Princip. Fliesst eine Flüssigkeit aus einer Oeffnung von ω qcm Querschnitt während der Zeit t mit der Geschwindigkeit von v cm sec^{-1} aus, so befindet sich das zu Beginn der ersten Secunde durch einen Punkt der Oeffnung gehende Theilchen am Ende derselben in einer Entfernung von v cm, vorausgesetzt, dass auf die Theilchen nach dem Austritt aus der Oeffnung keine Kraft mehr wirkt. Die durch alle Punkte der Oeffnung gehenden Theilchen erfüllen also am Ende der ersten Secunde einen Cylinder vom Querschnitt ω und der Länge v, sie nehmen daher ein Volumen ωv ein. Fliesst die Flüssigkeit t Secunden lang aus, so ist das ausgetretene Volumen $V = \omega v t$ cbcm. Man bestimmt die Ausflussgeschwindigkeit v, indem man die Zeit t ermittelt, die ein bestimmtes Volumen V braucht, um auszufliessen. Fliesst von zwei verschiedenen Flüssigkeiten 1 und 2 das gleiche Volumen V in den Zeiten t_1 und t_2 aus und sind v_1 und v_2 die ihnen zugehörigen Geschwindigkeiten, so ist $V = \omega v_1 t_1 = \omega v_2 t_2$, also:

$$v_1 : v_2 = t_2 : t_1.$$

Befindet sich in dem Boden eines Gefässes eine Oeffnung und steht die Flüssigkeit über derselben bis zur Höhe h, so ist nach dem Torricelli'schen Theorem die Ausflussgeschwindigkeit $v = \sqrt{2gh}$, d. h. die Flüssigkeitstheilchen haben beim Austreten durch die Oeffnung die gleiche Geschwindigkeit, wie wenn sie von der Oberfläche bis zur Oeffnung frei herunterfielen. Die Aus-

flussgeschwindigkeit ist unabhängig von der Natur der Substanz (wenn man von der Reibung absieht).

Uebung. 1) Eine 65 cm lange, am oberen Ende mit einer Marke, am unteren mit einer feinen Oeffnung versehene Röhre A, Fig. 57, wird nach einander mit Quecksilber und Wasser gefüllt, während man mit dem Finger der einen Hand die Oeffnung zuhält.

Fig. 57.

A

2) Man nimmt in die andere Hand ein Chronoskop, lässt zu gleicher Zeit die Arretirung und den Finger los und bestimmt die Zeit, bis die Flüssigkeit ausgelaufen ist. Sie ist bei Quecksilber und Wasser dieselbe. Der Druck ist im ersten Falle 13,6 mal grösser als im zweiten, aber die zu bewegende Masse ist auch ebensoviel mal grösser.

3) Man macht die beiden Flüssigkeitssäulen nicht gleich hoch, sondern so hoch (h_1 und h_2), dass der Druck auf den Boden in beiden Fällen der gleiche ist. Das Verhältniss dieser Höhen h_1 und h_2 ist, wenn d_1 und d_2 die Dichten der beiden Flüssigkeiten sind, $h_1 : h_2 = d_2 : d_1$; das Verhältniss der Ausflussgeschwindigkeiten ist dann $v_1 : v_2 = \sqrt{h_1} : \sqrt{h_2} = \sqrt{d_2} : \sqrt{d_1}$, also das Verhältniss der zum Ausfliessen gleicher Volumina nöthigen Zeiten:

$$t_1 : t_2 = \sqrt{d_1} : \sqrt{d_2}.$$

Die zum Ausfluss gleicher Volumina unter gleichem Druck erforderlichen Zeiten verhalten sich wie die Quadratwurzeln aus den Dichten.

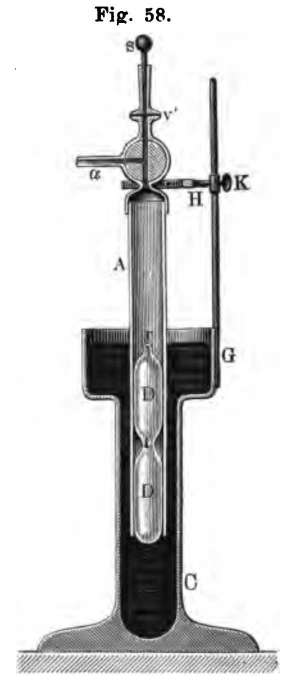
Derselbe Satz gilt für Gase, die unter gleichem Drucke stehen.

Apparat von Bunsen: An ein Glasrohr A (Fig. 58) ist oben ein eiserner Dreiweghahn angekittet, der mit einem seitlichen Rohre α und einem nach oben gehenden Ansatze v' verbunden ist. Bei v' ist ein dünnes, mit einem sehr feinen Loch durchbohrtes Platinblech befestigt, das beim Nichtgebrauch des Apparates durch den Stöpsel s vor Staub geschützt ist. Das Glasrohr taucht in einen mit Quecksilber gefüllten Eisen- oder Holzcylinder, in dessen oben erweiterten Theil an zwei einander gegenüberstehenden Stellen Spiegelglasplatten eingesetzt sind. In dem Cylinder befindet sich ein Schwimmer DD, der bei t zwei Marken über einander trägt.

Uebung. 1) Man füllt A mit dem zu untersuchenden Gase. Dazu verbindet man α mit dem Gasentwickelungsapparat und stellt den Dreiweghahn so, dass das Gas in A einströmen kann; man stellt das Rohr A zunächst möglichst tief, hebt es dann langsam in die Höhe, bis es ganz mit Gas gefüllt ist, dreht den Hahn so, dass es beim Niederdrücken

drücken von A durch v' entweichen muss, und drückt A nieder. Dies wiederholt man so oft (zwei- bis dreimal), bis man annehmen kann, dass A nur noch das zu untersuchende Gas enthält. Dann füllt man A noch einmal ganz, dreht den Hahn so, dass keine Verbindung mit der Umgebung vorhanden ist und drückt den Cylinder A möglichst tief ein.

Fig. 58.



2) Man nimmt das Chronoskop zur Hand, stellt den Hahn so, dass A durch v' mit der Umgebung communicirt, visirt über die Quecksilberoberfläche durch die Spiegelglasscheiben hin, lässt in dem Moment, wo die Spitze r des Schwimmers über die Quecksilberoberfläche heraustritt, das Chronoskop angehen und arretirt dasselbe, wenn die zweite Marke bei t dieselbe Lage einnimmt. Die über t befindliche erste Marke dient dazu, den Beobachter auf das Hervortreten der zweiten vorzubereiten.

Die zum Ausfluss nöthige Zeit sei t_1.

3) Man füllt den Cylinder mit trockener Luft und wiederholt den Versuch. Die Zeit des Ausflusses, während der Schwimmer bis zur Marke t steigt, sei jetzt t_2.

Dann entsprechen t_1 und t_2 dem Ausflusse des gleichen Volumens, welches beim Steigen der Quecksilbersäule um die Strecke rt verdrängt wird.

Berechnung. Es ist $t_1 : t_2 = \sqrt{d_1} : \sqrt{d_2}$, wo d_1 die Dichte des Gases, d_2 die Dichte der Luft ist. Die auf die Dichte der Luft als Einheit bezogene Gasdichte ist also:

$$d = t_1^2/t_2^2.$$

Die Versuche sind mit Kohlensäure und Wasserstoff anzustellen.

Beispiel:
CO_2: $t_1 = 26{,}5$; $t_1 = 5{,}6$; $t_2 = 21{,}4$; $d = 1{,}53$; H_2: Luft: $d = 0{,}0685$.

Allgemeines.

1. Unter Annahme des Boyle-Charles'schen Gesetzes lässt sich theoretisch aus der kinetischen Gastheorie das ursprünglich auf anderem Wege gefundene, oben (S. 88) angeführte „Avogadro'sche Gesetz" ableiten.

Die bei den Gasen und Dämpfen aus den Beobachtungen bei irgend einer Temperatur und einem beliebigen Drucke abgeleitete Dichte kann nur dann mit den theoretisch aus dem Avogadro'schen Gesetze gefun-

denen Werthen übereinstimmen, wenn bei den benutzten Temperaturen und Drucken das Boyle-Charles'sche Gesetz streng gültig ist. Die durch die vorhandenen Abweichungen von diesen Gesetzen hervorgebrachten Differenzen sind aber zu klein, als dass nicht die für den Chemiker wichtige Entscheidung, das Wievielfache das Moleculargewicht von dem aus der Analyse gefundenen Werthe ist, auf Grund einer sorgfältigen Dampfdichtebestimmung gefällt werden könnte.

2. a) Die Dampfdichtebestimmungen und damit die Moleculargewichtsbestimmungen haben den Zweck, das Moleculargewicht einer Verbindung, deren procentische Zusammensetzung durch die Analyse festgestellt ist, zu ermitteln. Während man durch die Analyse z. B. nicht zu entscheiden vermag, ob ein Kohlenwasserstoff die Zusammensetzung C_2H_4, C_3H_6, C_4H_8 hat, da jeder derselben 14,3 Proc. H und 85,7 Proc. C enthält, so ergeben sich für die Dampfdichten Δ die Werthe für:

$$C_2H_4:\ \Delta = 0{,}97; \quad C_3H_6:\ \Delta = 1{,}45; \quad C_4H_8:\ \Delta = 1{,}94;$$

sie lassen also eine Entscheidung über die Formel des Körpers zu.

b) Weiter dient die Dampfdichte dazu, die Werthigkeit eines Elementes zu bestimmen. Je nachdem z. B. das Aluminiumchlorid eine der beiden nach der Analyse gleich berechtigten Formeln $AlCl_3$ oder Al_2Cl_6 besitzt, ist das Aluminium drei- oder vierwerthig. Die Dampfdichte hat für das erstere entschieden.

c) Die Dampfdichtebestimmung lässt ferner erkennen, ob ein Körper im Dampfzustande dissociirt ist oder nicht, was auf anderem Wege zu entscheiden oft nicht möglich ist, indem sich bei der Abkühlung die ursprüngliche Substanz wieder bildet. — Salmiak, NH_4Cl, würde unzersetzt im Dampfzustande die Dampfdichte 1,85 haben, er hat aber nur eine Dampfdichte 0,92, er ist in NH_3 und HCl zerfallen.

Bei einem Körper, dessen Dampfdichte mit steigender Temperatur abnimmt, müssen wir annehmen, dass er bei niedrigeren Temperaturen in geringerem Maasse dissociirt ist, als bei höheren; so verhält sich das Jod, dessen Dampf bei niedrigeren Temperaturen aus Molecülen J_2, bei sehr hohen aus Molecülen J und bei zwischenliegenden aus einem Gemisch von Molecülen J_2 und J besteht.

3. Aus den Dichten der Dämpfe und Gase lassen sich zunächst keine Schlüsse auf die Dimensionen ihrer Molecüle ziehen, da dieselben, verglichen mit den mittleren Abständen zwischen ihnen, sehr klein sind; dagegen ist dies aus den Abweichungen von dem Boyle-Charles'schen Gesetze möglich (vergl. S. 80). Ebensowenig erhalten wir die Gewichte der Molecüle selbst aus Dampfdichtebestimmungen, sondern nur das Verhältniss der Gewichte der Molecüle zweier Gase zu einander.

VII. Elasticität.

Einleitung. Ertheilen wir einem festen Körper durch eine äussere Kraft eine Formveränderung, so sucht derselbe mehr oder weniger vollständig seine frühere Gestalt wieder anzunehmen, er besitzt eine gewisse Elasticität. Wir bezeichnen die hiermit zusammenhängenden Erscheinungen als elastische. Je nach der Art der Formveränderung unterscheiden wir eine Elasticität der Dehnung, der Biegung, der Torsion und der Compression.

Vollkommen elastische Körper sind solche, die nach dem Aufhören der Kraft vollkommen in ihren Anfangszustand zurückkehren, unvollkommen elastische sind solche, bei denen dies nicht der Fall ist. Wir betrachten nur vollkommen elastische Körper, ermitteln die Gesetze, welche die Grösse der Formveränderung als abhängig von der Grösse der wirkenden Kraft und den Dimensionen der Körper darstellen, und bestimmen die für jeden Körper eigenthümlichen Elasticitätsconstanten. Unter elastischer Nachwirkung verstehen wir die Erscheinung, dass der Endzustand nicht unmittelbar nach Einwirkung der Kraft oder Aufhören derselben, sondern erst nach längerer Zeit eintritt, bezw. dass während längerer Zeit noch Gestaltsänderungen eintreten, ohne dass die äussere Kraft verändert wird.

1. Elasticität der Dehnung.

Gebraucht wird: Kautschukfäden von 5 und 10 mm Durchmesser mit Hülsen und Zeigern; verticaler Maassstab; zwei dünne Silberdrähte; Träger in der Wand, kleines Ablesekathetometer; Ocularmikrometer; Gewichte zum Anhängen; Dickenmesser; Waage; Gewichtssatz.

Princip. Hängen wir einen Draht L, Fig. 59 (a. f. S.), vertical auf und belasten sein unteres Ende mit einem Gewichte P, so erfährt er eine Dehnung.

Die Dehnung λ eines Drahtes ist, wenn sie klein ist, direct proportional dem wirkenden Gewichte P, der Länge des Drahtes L, umgekehrt proportional dem Querschnitte Q; also ist:

$$\lambda = \varepsilon \frac{PL}{Q}.$$

Hier ist ε eine für jeden Körper charakteristische Constante, der Elasticitätscoëfficient. Ist das wirkende Gewicht, die Länge und

der Querschnitt des Drahtes gleich Eins, d. h. $P = 1$, $L = 1$, $Q = 1$, so ist

$$\lambda = \varepsilon.$$

Der Elasticitätscoëfficient ε ist die Verlängerung λ, die ein Draht von der Länge 1 und dem Querschnitt 1 durch das Gewicht 1 erfährt.

Statt des Elasticitätscoëfficienten ε führt man auch den Elasticitätsmodul E ein:

$$E = \frac{1}{\varepsilon}, \quad \text{also} \quad E = \frac{PL}{Q\lambda}.$$

Ist $L = 1$, $Q = 1$, $\lambda = 1$, so ist

$$E = P,$$

d. h. der Elasticitätsmodul E ist das Gewicht, welches einen Draht von der Länge 1 und dem Querschnitt 1 um die Länge 1 ausdehnen würde.

Als Einheiten dienen hier das Kilogramm, das Millimeter [1]) und das Quadratmillimeter [1]).

Fig. 59.

a) Apparat. Um die Gesetze der Dehnungselasticität zunächst angenähert zu prüfen, verwenden wir Kautschukfäden, kitten ihre Enden mit Siegellack in Hülsen und Haken und halten sie in denselben noch durch durchgesteckte Stifte fest. Der obere Haken wird an einem gebogenen Draht zwischen die Platten eines Trägers gespannt, der an der Wand befestigt ist, und der an seinem Ende eine verticale, feste Messingplatte trägt, gegen die sich eine andere durch Schrauben anpressen lässt; an den unteren Haken wird eine Waagschale mit den Gewichten angehängt. Ueber die Hülsen sind Messingröhrchen mit Zeigern geschoben, die sich längs einer Scala verschieben.

Uebung. 1) Man misst die Verlängerungen eines Kautschukfadens von der Dicke von 5 mm und der Länge von 500 mm bei Belastungen von 100, 200 ... 600 gr. Sind die Dehnungen $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_6$, so ist $\lambda_1 = {}^1/_2\,\lambda_2 = \cdots {}^1/_6\,\lambda_6$.

2) Man nimmt einen Kautschukfaden von derselben Dicke und der doppelten Länge; bei der Belastung mit 200 gr sei die Dehnung λ'_2, dann ist $\lambda'_2 = 2\,\lambda_2$.

3) Man nimmt einen Kautschukfaden von der Dicke von 10 mm, also dem vierfachen Querschnitt wie bei 1, und der Länge von 500 mm; bei der Belastung von 600 gr ist die Dehnung λ''_6, dann ist $\lambda'_6 = {}^1/_4\,\lambda_6$.

4) Man berechnet aus den Dimensionen und den gefundenen Dehnungen den Elasticitätsmodul E.

---

[1]) Die auf diese Einheiten bezogenen Werthe der Elasticitätsmoduln muss man mit $9{,}81 \,.\, 10^7$ multipliciren, um sie auf das absolute (C.-G.-S.-) System zurückzuführen.

Beispiel: Die Dicke eines Kautschukfadens von kreisförmigem Querschnitt war 10 mm, der Querschnitt also $Q = \pi \times (5\,\mathrm{mm})^2$, die Länge $L = 680$ mm, das Gewicht $P = 0{,}8$ kgr und $\lambda = 115$ mm, also ist $E = 0{,}06024$.

Anmerkung. Die Messungen müssen etwas schnell ausgeführt werden, da der Kautschuk starke elastische Nachwirkung zeigt, d. h. bei dauernder Belastung steigende Dehnungen erfährt.

b) Apparat. Für Metalldrähte, deren Dehnung bei der Belastung sehr klein ist, bei denen E sehr gross ist, müssen wir feinere Hülfsmittel anwenden.

Man hängt einen sehr langen Draht so auf, dass man sein oberes Ende zwischen die Platten eines Trägers festklemmt, macht auf ihm oben und unten eine Marke und bestimmt den Abstand zwischen beiden bei verschiedenen Belastungen. Damit die Längenänderungen aber einigermaassen beträchtlich werden, brauchen wir sehr grosse Längen, dann muss aber das Messinstrument zu grosse Dimensionen erhalten. Wollte man nur die Stellung der unteren Marke ablesen, so würde man falsche Werthe erhalten, da sich auch die Träger, an denen die Drähte aufgehängt sind, bei der Belastung der Drähte senken. Dieser Fehler wird folgendermaassen vermieden:

Man hängt dicht neben einander an dem in die Wand eingelassenen Träger zwei Drähte A und B auf, während man sie schwach belastet, so dass sie gestreckt sind. Beide erhalten unten in demselben Abstande vom oberen Ende Marken. Vor den beiden Drähten wird, in der Höhe der beiden Marken, das Fernrohr eines Kathetometers, am besten mit Ocularmikrometer, aufgestellt, und die Höhendifferenz der Marken an den beiden Drähten bei verschiedenen Belastungen des einen ermittelt. Diese Differenz ergiebt die Dehnung des untersuchten Drahtes. Senkt sich bei der Belastung der Träger ein wenig, so trifft dies beide Drähte in gleicher Weise.

Uebung. α) Bestimmung der Dehnung λ.

Man belastet beide Drähte nur wenig:

1. Lage der Marke auf A . . . . a
2. „ „ „ „ B . . . . b

Man hängt 1 kgr an A an:

3. Lage der Marke auf A . . . . a_1
4. „ „ „ „ B . . . . b_1

   Dehnung durch 1 kgr . . . $\lambda_1 = (a_1 - b_1) - (a - b)$

5. und 6. Man bestimmt die Dehnung λ_2 bei Belastung mit 2 kgr, λ_3 bei 3 kgr u. s. f. Dann muss sein $\lambda_2 = 2\,\lambda_1$, $\lambda_3 = 3\,\lambda_1$ u. s. f.

Um den Elasticitätscoëfficienten zu erhalten, müssen wir noch die Länge L und den Querschnitt Q des Drahtes bestimmen.

β) Bestimmung von L. Man misst den Abstand der Marke von dem Aufhängungspunkte mit einem gewöhnlichen Maassstabe.

γ) Bestimmung des Querschnittes Q.

a) Ist der Draht nicht zu dünn und kreisrund, so misst man den Durchmesser δ mit einem Dickenmesser (S. 19), der Querschnitt ist dann $Q = \pi\ ({}^1/_2\,\delta)^2$.

b) Ist der Draht sehr dünn, so schneidet man ein Stück von der Länge l ab, bestimmt sein Gewicht G; ist d die Dichte der Substanz, so ist (vergl. S. 55): $Q = G/l\,d$.

2. Elasticität der Biegung.

Gebraucht wird: Apparat Fig. 61; drei Stahlstäbe, Kupferstab; verticale Scala; Gewichte zum Anhängen; Dickenmesser.

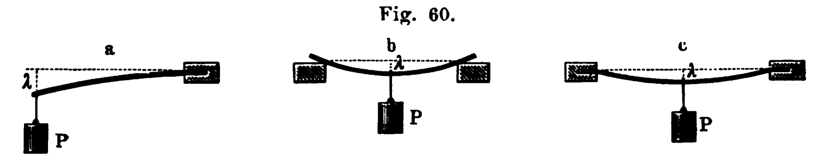
Princip: Hängt man an einen in horizontaler Richtung befestigten Stab von rechteckigem Querschnitt von der Länge L, der Höhe H, der Breite B ein Gewicht P (s. Fig. 60), so biegt sich der Stab.

Die Senkung λ des Aufhängepunktes des Gewichtes ist:

$$\lambda = k\,\varepsilon\,\frac{PL^3}{BH^3},$$

d. h. sie ist direct proportional dem Gewichte und der dritten Potenz der Länge, umgekehrt proportional der Breite und der dritten Potenz

Fig. 60.



der Höhe. Die Grösse k hängt von der Art der Befestigung ab, bezüglich deren drei Hauptfälle (Fig. 60) zu unterscheiden sind:

a) Ein Ende ist frei, das andere fest: $k = 4$; b) beide Enden sind frei und ruhen auf Schneiden; $k = {}^1/_4$; c) beide Enden sind fest; $k = {}^1/_{16}$.

Die Grössen der Biegungen α_1, α_2, α_3 bei dem gleichen Stabe, bei gleicher Länge und Belastung verhalten sich also in den drei Fällen wie

$$\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 64 : 4 : 1.$$

Der Elasticitätsmodul ist

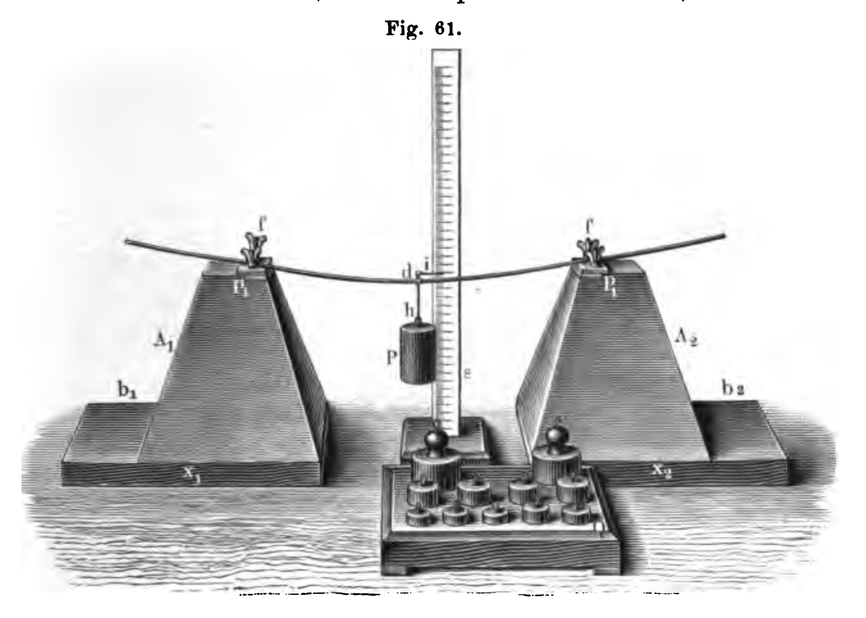
$$E = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{kPL^3}{\lambda BH^3}.$$

Apparat, Fig. 61. Derselbe besteht aus zwei Holzklötzchen A_1 und A_2 (Höhe circa 23 cm, Breite an der Basis 20, oben 7 cm), welche unten auf Bretter x_1 und x_2 aufgeleimt sind, auf die bei b_1 und b_2 Gewichte gesetzt werden können. Oben tragen diese Klötze Klemmen $P_1\,P_1$, welche je aus zwei Platten bestehen, von denen die eine auf dem Klotze festgeschraubt ist, die andere durch Flügelschrauben f gegen die erstere gedrückt oder auch von ihr abgenommen werden kann. Zur Beobachtung der Durchbiegung dient der Index i, der an einem zu einem

Rechteck *d* gebogenen Drahte befestigt ist, welcher über die Stäbe geschoben werden kann und zum Anhängen des Gewichtes *P* einen Haken bei *h* trägt. Der Index verschiebt sich längs einer auf einem besonderen Holzstativ befestigten verticalen Scala *s* [1]).

Benutzt werden z. B. drei Stahlstäbe, ca. 800 mm lang, die resp. nahe gleiche Breite, aber verschiedene Höhe, oder gleiche Höhe, aber verschiedene Breite haben, und ein Kupferstab von etwa 1,6 mm Dicke

Fig. 61.



und 10 mm Breite. Am einen Ende sind die Stäbe ein wenig aufgebogen, damit der Draht *d* nicht heruntergleitet.

Uebung. Der Gang der Uebung zur Prüfung der Gesetze geht aus folgendem Beispiel hervor:

Benutzt werden drei Stahlstäbe: I. $H = 3{,}3$ mm, $B = 9{,}4$ mm, II. $H = 3{,}2$ mm, $B = 14{,}5$ mm, III. $H = 1{,}5$ mm, $B = 10{,}1$ mm.

Es werden zunächst die Stäbe nur an einem Ende eingeklemmt; der Klotz A_1 wird fortgenommen, Scala und Index an das Ende des Stabes gerückt und dann letzterer belastet.

Stab I wird bei verschiedenen Belastungen und in zwei Längen untersucht:

a) $L = 600$ mm	$P =$	0,1	0,2	0,4	0,5 kgr	
	$\lambda =$	12	25	51	62,4 mm	
	$\lambda/P =$	120	125	128	125 „	Mittel 125.

[1]) Bei genauen Messungen bestimmt man die Durchbiegung mittelst eines Kathetometers, das man auf einen Punkt des Stabes selbst einstellt, oder man kittet auf den Stab eine feine Glasscala, die man durch ein Mikroskop mit Fadenkreuz betrachtet.

Die Biegung ist also proportional der Belastung:

b) $L = 300$	$P = 0{,}5$	$0{,}8$ kgr	
	$\lambda = 8$	$13{,}5$ mm	
	$\lambda/P = 16$	17 „	Mittel 16,5.

Ist die Biegung der dritten Potenz der Länge proportional, so muss

$$125/(600)^3 = 5{,}8 \,.\, 10^{-7} \text{ gleich sein } 16{,}5/(300)^3 = 6{,}1 \,.\, 10^{-7},$$

was in der That nahe der Fall ist.

Aus dem Werthsystem $L = 300$, $P = 0{,}5$ kgr, $\lambda = 8$ berechnet sich, da der Stab an dem einen Ende festgeklemmt, also $k = 4$ ist:

$$E = \frac{4 \,.\, 0{,}5 \,.\, (300)^3}{8 \,.\, 9{,}4 \,.\, (3{,}3)^3} = 19\,980.$$

Stab II. Für diesen ergeben sich als zusammengehörige Werthe:

$$L = 300, \qquad P = 0{,}8, \qquad \lambda = 9{,}5.$$

Hieraus folgt: $E = \frac{4 \,.\, 0{,}8 \,.\, (300)^3}{9{,}5 \,.\, 14{,}5 (3{,}2)^3} = 19\,140.$

Da für diesen Stab, der dieselbe Dicke wie I, aber etwa die anderthalbfache Breite hat, sich derselbe Werth von E wie für I ergiebt, so folgt, dass die Biegung in der That umgekehrt proportional der Breite ist.

Stab III. Für diesen ergaben sich als zusammengehörige Werthe: $L = 600$, $P = 0{,}05$, $\lambda = 62$, also:

$$E = \frac{4 \,.\, 0{,}05 \,.\, (600)^3}{62 \,.\, 10{,}1 \,.\, (1{,}5)^3} = 20\,450.$$

Da für Stab III, der dieselbe Breite aber die halbe Dicke wie I hat, sich derselbe Werth von E wie für I ergiebt, so folgt, dass die Biegung umgekehrt proportional der dritten Potenz der Dicke ist.

Um noch zu prüfen, ob die Werthe von k die oben angegebene Grösse besitzen, wird der Stab III in der Länge $L = 600$ verwendet; dann wird:

1. am einen Ende festgeklemmt: $P_1 = 0{,}05$, $\lambda_1 = 62$, $\alpha_1 = \lambda_1/P_1 = 1240$;
2. beide Enden frei aufgelegt: $P_2 = 0{,}8$, $\lambda_2 = 70$, $\alpha_2 = \lambda_2/P_2 = 87{,}5$;
3. beide Enden festgeklemmt: $P_3 = 0{,}8$, $\lambda_3 = 18$, $\alpha_3 = \lambda_3/P_3 = 22{,}5$.

In der That verhält sich also nahe: $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 64 : 4 : 1$.

3. Elasticität der Torsion.

Gebraucht wird: Torsionsapparat, Fig. 63, zwei Messingdrähte von circa 2,2 mm und 3,0 mm Durchmesser; Kreuz mit Stiften; durchbohrte Bleigewichte; Chronoskop.

Einleitung. Klemmen wir das eine Ende eines Drahtes fest und drillen sein anderes Ende, so entsteht in dem Drahte in Folge der Verschiebung der Molecüle gegen einander eine Kraft, die Torsionskraft, welche den Draht in seine frühere Lage zurückzuführen strebt. Diese Kraft ist bei vollkommen elastischen Drähten proportional dem Winkel der Drillung oder der Torsion. Sie wechselt unter sonst gleichen Umständen mit der Natur der Substanz; jede Substanz ist in Bezug auf die Torsion durch eine Constante, den Torsionscoëfficienten, charakterisirt. Zur Bestimmung des Torsionscoëfficienten werden zwei Methoden benutzt.

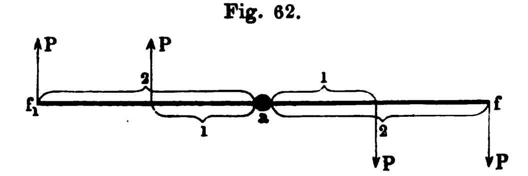
A. Statische Methode.

Princip. Befestigen wir am unteren Ende des Drahtes mit dem Querschnitt a (Fig. 62) einen horizontalen Arm ff_1, und lassen zunächst in dem Abstande 1 auf beiden Seiten je eine gleich grosse und entgegengesetzt gerichtete Kraft P, ein sogenanntes Kräftepaar (damit das Drahtende nicht seitlich verschoben wird), wirken, so wird durch dasselbe der Draht so lange gedrillt, bis die sich in ihm entwickelnde Torsionskraft den äusseren Kräften das Gleichgewicht hält.

Bei allen drehenden Kräften ist die Wirkung abhängig von der Grösse der Kraft P und dem Abstande l, in dem sie angreift, von dem „Moment" Pl. Rückt der Angriffspunkt der Kraft P also in den doppelten Abstand von a nach f und f_1, so greift sie an einem doppelt so langen Hebelarm an, ihr Drehungsmoment ist doppelt so gross, und der Draht muss, ehe Gleichgewicht eintritt, sich doppelt so stark tordiren, weil erst dann die Torsionskraft doppelt so gross wird.

Die Grösse der Drehung, der Torsionswinkel φ, hängt ab von der wirkenden Kraft P, dem Abstande l ihres Angriffspunktes von der Axe

Fig. 62.



des Drahtes, ferner von der Länge des Drahtes L, dem Radius R desselben und einer Constanten, dem Torsionscoëfficienten T; es ist:

$$\varphi = \frac{1}{T} \cdot \frac{L}{R^4} Pl, \text{[1]}$$

also:

$$T = \frac{L \cdot Pl}{R^4 \varphi}.$$

Ist $\varphi = 1$, so ist das Moment der rücktreibenden Kraft

$$f = Pl = T \cdot R^4/L.$$

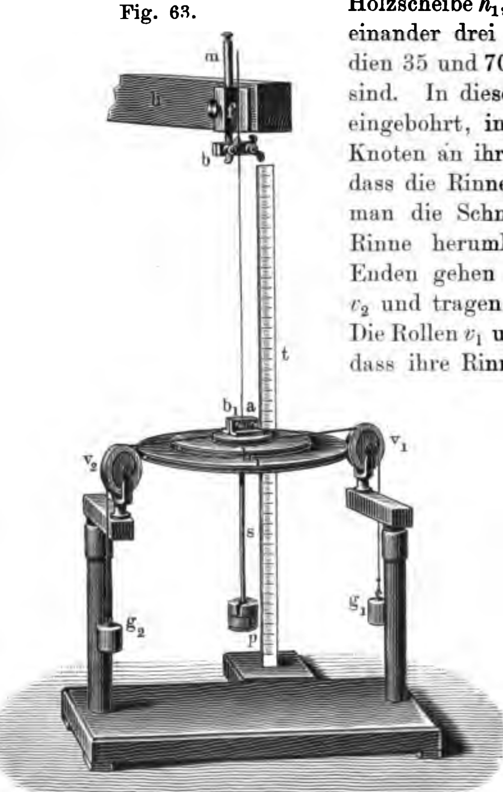
Als Einheit der Länge dient hier wie oben das Millimeter, als Einheit der Kraft das Kilogramm, als Einheit des Winkels derjenige, dessen Bogen gleich dem Radius ist, nämlich $\alpha_1 = 57{,}296^0$; lesen wir also an einem Kreise in gewöhnlicher Weise, vergl. S. 25, einen Winkel α ab, so ist $\varphi = \alpha/57{,}296$.

Apparat. Der zu untersuchende Draht wird an seinem oberen Ende zwischen zwei Messingplatten b, Fig. 63 (a. f. S.), die durch zwei Flügelschrauben an einander gepresst werden, festgehalten. Dieselben

[1]) In der Figur 62 wirkt auf jeder Seite die Kraft P, also im Ganzen eine Kraft $2P$.

sind an einem Messingstabe m befestigt, der sich hoch und niedrig stellen lässt. Die den Stab m tragende Führung f ist an einen horizontalen Balken h angeschraubt, der sich an einem hohen Ständer in verschiedenen Höhen festklemmen lässt. Das untere Ende a des Drahtes ist fest mit der zur Anbringung der tordirenden Kräfte dienenden Vorrichtung verbunden, und zwar durch zwei auf einander zu schraubende Messingplatten b_1. Diese Vorrichtung selbst besteht aus einer dünnen Holzscheibe h_1, in die etagenförmig über einander drei Hohlrinnen von den Radien 35 und 70 und 105 mm eingedreht sind. In dieselben sind kleine Löcher eingebohrt, in denen die Schnüre mit Knoten an ihren Enden festhängen, so dass die Rinnenfurche frei bleibt, und man die Schnüre einige Male in der Rinne herumlegen kann; die freien Enden gehen über die Rollen v_1 und v_2 und tragen die Gewichte g_1 und g_2. Die Rollen v_1 und v_2 werden so gestellt, dass ihre Rinnen in der Verlängerung von Tangenten an die Rinnen der Holzscheibe liegen. Dann schmiegen sich letzteren die Schnüre vollkommen an.

Fig. 63.



An der Holzscheibe ist unten ein Stab s mit einer Platte p angebracht. Auf diese legt man die Gewichte, die den Draht spannen. Der Umfang der Holzscheibe ist getheilt und neben derselben ein sie fast berührender Stab t aufgestellt, an dem die Drehungen der Scheibe abgelesen werden.

Uebung. Prüfung der Gesetze und Bestimmung der Torsionscoëfficienten.

1) Man hängt, während man die Gewichte an derselben Rinne, also an demselben Hebelarm angreifen lässt, Gewichte 1, 2, 3 an die Schnüre; die Drehungen sind α, 2α, 3α.

2) Man legt verschiedene grosse Gewichte auf p, während dieselben Gewichte wie vorher an den Schnüren angreifen, der Torsionswinkel bleibt

der gleiche; die Torsion ist unabhängig von der Spannung des tordirten Drahtes.

3) Man hängt die Gewichte mittelst der Schnüre an die Stifte in den Rinnen mit dem einfachen, doppelten, dreifachen Durchmesser, macht also die Länge $l = 1, 2, 3$; bei gleichem Gewichte sind die Drehungen α, 2α, 3α, d. h. die Torsionswinkel verhalten sich direct wie die Drehungsmomente.

4) Man zieht den Draht zwischen den Platten b hindurch und verkürzt ihn dadurch. Gleichzeitig senkt man den ihn tragenden Balken f, so dass die Holzscheibe stets in derselben Horizontalebene mit den Rollen bleibt.

5) Bei den Längen 1, $^3/_4$, $^1/_2$, $^1/_4$ findet man die Drehungen α, $^3/_4\alpha$, $^1/_2\alpha$, $^1/_4\alpha$, die Drehungen sind also direct proportional den Längen des Drahtes.

6) Man ersetzt den Draht von der Dicke d' durch einen Draht einer anderen Dicke d'' und untersucht ihn bei derselben Länge und demselben Gewicht am gleichen Hebelarm wie den ersten; die Drehungen seien α' und α'', dann ist $\alpha' : \alpha'' = d''^4 : d'^4$.

Die Drehungen sind der vierten Potenz der Dicke umgekehrt proportional.

7) Aus irgend einem zusammengehörigen System von Gewicht, Hebelarm, Länge, Dicke und Drehungswinkel berechnet man T.

Beispiel: Bestimmung des Torsionscoëfficienten für Messing. Dicke des Drahtes $2R = 2{,}2$ mm; $L = 420$ mm; $P = 2 \times 0{,}2$ kgr; $l = 70$ mm; $\alpha = 98^0$; $\varphi = 98/57{,}296$, daraus folgt $T = 4770$.

B. Dynamische Methode.

Princip. Wird ein mathematisches Pendel von der Länge L aus seiner Gleichgewichtslage gebracht und dann losgelassen, so schwingt es in Folge der Wirkung der Schwerkraft. Die Schwingungsdauer t ist (S. 37):

$$t = \pi \sqrt{L/g}.$$

Tordiren wir einen Draht, so entwickeln sich in demselben Kräfte, die, wenn man den Draht loslässt, den Pendelschwingungen analoge Schwingungen um seine Axe hervorrufen.

Ist eine Masse m im Abstande ϱ von der Drehungsaxe angebracht, so nennt man $m\varrho^2$ ihr Trägheitsmoment. Die Summe aller $m\varrho^2$ bei einem Körper, also $\Sigma m\varrho^2 = Mk^2$, ist das Trägheitsmoment des Körpers, wo M seine Gesammtmasse ist. Wirkt auf einen Körper vom Trägheitsmomente Mk^2 eine Kraft P am Hebelarm l, ist $P.l = f$ das Drehungsmoment dieser Kraft oder eines Systems von Kräften, das ihr das Gleichgewicht hält, t die Schwingungsdauer des Körpers um diejenige Axe, auf welche sich Mk^2 bezieht, so ist:

$$t = \pi \sqrt{Mk^2/f}.$$

Beziehen sich t_1, M_1, k_1, f_1 auf eine Messung, t_2, M_2, k_2, f_2 auf eine zweite, so ist:

$$t_1 = \pi \sqrt{M_1 . k_1^2/f_1} \quad \text{und} \quad t_2 = \pi \sqrt{M_2 . k_2^2/f_2}$$

oder

$$\frac{t_1^2}{t_2^2} = \frac{M_1 k_1^2}{M_2 k_2^2} \frac{f_2}{f_1}.$$

Apparat. An Stelle der Scheibe h_1 wird ein horizontales Kreuz aus leichtem Holz unten am Draht befestigt, in dessen Arme in den Abständen von $\varrho = 1, 2, 3$ nämlich 38, 76, 114 mm von der Axe Stifte eingesetzt sind; über diese Stifte werden 0,1 kgr schwere cylindrische Bleigewichte mit einem Loche in der Mitte von 1 mm Durchmesser geschoben. Wir nehmen an, dass ihre ganze Masse in ihrer Axe, also im Abstande der Stifte vom Draht concentrirt sei. Das Kreuz ist so leicht, dass man in erster Annäherung sein Trägheitsmoment gegen dasjenige der Gewichte vernachlässigen kann.

Uebung. 1) Man stellt den Stab t, Fig. 63, neben den einen Arm des Kreuzes.

2) Man tordirt den Draht, lässt ihn los und setzt ein Chronoskop in Gang, wenn der Arm des Kreuzes an dem Stabe in einer Richtung vorbeigeht und zählt die Vorübergänge in derselben Richtung.

3) Nach einer Anzahl n von Vorübergängen hält man das Chronoskop an und liest die verflossene Zeit z ab. In der Zeit z sind $2n$ Schwingungen (vgl. Anmerkung S. 36) ausgeführt worden, es ist also:

$$t = z/2n.$$

4) Aus den Dimensionen und den beobachteten Schwingungsdauern berechnet man den Torsionscoëfficienten.

Beispiel: Messingdrähte; Radius $r = 1{,}1$ und 0,57 mm, Länge = circa 1000 mm.

1) Wir geben der Anfangsamplitude verschiedene Grössen, die Schwingungsdauern bleiben dieselben, die Schwingungen sind isochron (vergl. S. 36).

2) Wir setzen verschieden grosse Massen $M_1\, M_2$ (Gewichte in Kilogrammen) in demselben Abstande ϱ auf und bestimmen die Schwingungsdauern. Es ist:

$$f_1 = f_2 \quad \text{und} \quad t_1 : t_2 = \sqrt{M_1/M_2};$$

$$M_1 = 4 \times 0{,}2, \quad \varrho = 3, \quad n_1 = 15, \quad z_1 = 25{,}5, \quad t_1 = 0{,}85;$$
$$M_2 = 4 \times 0{,}3, \quad \varrho = 3, \quad n_2 = 15, \quad z_2 = 31 \quad t_2 = 1{,}03;$$
$$\sqrt{M_1/M_2} = \sqrt{2/3} = 0{,}82, \quad t_1 : t_2 = 0{,}82.$$

Die Schwingungsdauern verhalten sich wie die Wurzeln aus den Massen.

3) Wir setzen dieselben Gewichte in die Abstände $\varrho_1\, \varrho_2 \ldots$, dann ist

$$t_1/t_2 = \varrho_1/\varrho_2;$$

$$M_1 = 4 \times 0{,}3, \quad \varrho_1 = 3, \quad n_1 = 15, \quad z_1 = 31, \quad t_1 = 1{,}03;$$
$$M_2 = 4 \times 0{,}3, \quad \varrho_2 = 2, \quad n_2 = 15, \quad z_2 = 21, \quad t_2 = 0{,}7;$$
$$\varrho_1 : \varrho_2 = 1{,}5, \quad t_1 : t_2 = 1{,}48.$$

Die Schwingungsdauern verhalten sich wie die Abstände der Massen von der Drehungsaxe.

4) Wir ändern die Länge des Drahtes und lassen den Radius gleich, d. h. es ist $M_1 = M_2$, $\varrho_1 = \varrho_2$, dann ist:

$$t_2 : t_1 = \sqrt{f_1/f_2}, \text{ oder weil } f = Pl = TR^4/L, \text{ auch } t_2 : t_1 = \sqrt{L_2/L_1};$$
$$M_1 = 4 \times 0{,}3, \quad \varrho = 3, \quad L_1 = 500, \quad n_1 = 15, \quad z_1 = 31, \quad t_1 = 1{,}03;$$
$$M_2 = 4 \times 0{,}3, \quad \varrho = 3, \quad L_2 = 250, \quad n_2 = 15, \quad z_2 = 22{,}5, \quad t_2 = 0{,}75;$$
$$\sqrt{L_1/L_2} = \sqrt{2} = 1{,}41, \quad t_1/t_2 = 1{,}38.$$

Die Schwingungsdauern verhalten sich wie die Wurzeln aus den Längen
5) Wir machen $M_1 = M_2 = 4 \times 0{,}3$, $\varrho_1 = \varrho_2 = 3$, $L_1 = L_2 = 500$ ändern aber den Radius, dann ist:

$$t_2/t_1 = \sqrt{f_1/f_2} = \sqrt{r_1^4/r_2^4} = r_1^2 : r_2^2;$$
$$r_1 = 0{,}57, \quad n_1 = 6, \quad z_1 = 46, \quad t_1 = 3{,}83;$$
$$r_2 = 1{,}1, \quad n_2 = 15, \quad z_2 = 31, \quad t_2 = 1{,}03:$$

dann ist:

$$r_1^2 : r_2^2 = 0{,}269, \quad t_2 : t_1 = 0{,}270.$$

Die Schwingungsdauern t_1 und t_2 verhalten sich umgekehrt wie die Quadrate der Radien.

6) Wir berechnen den Torsionscoëfficienten T.

Nach den in I. gegebenen Formeln ist:

$$f = \frac{TR^4}{L} = \pi^2 \frac{Mk^2}{t^2} \quad \text{und} \quad T = \frac{\pi^2}{t^2} \frac{L}{R^4} \cdot Mk^2.$$

Für Messing war $L = 250$ mm, $R = 1{,}1$ mm, $\varrho = k = 115$ mm, $t = 0{,}75$ sec. M ist die Masse des Gewichtes von $4 \times 0{,}3$ kgr $= 1{,}2$ kgr, also wenn wir die Beschleunigung g durch die Schwere zu rund 10000 mm sec^{-2} setzen, $M = 1{,}2/10000$. Setzen wir dies ein, so wird:

$$T = \frac{(3{,}14)^2 \,.\, 250 \,.\, 1{,}2 \,.\, (115)^2}{(0{,}75)^2 \,.\, (1{,}1)^4 \,.\, 10000} = 4750.$$

Nahezu derselbe Werth, wie er S. 113 nach der statischen Methode erhalten wurde.

VIII. Innere Reibung der Flüssigkeiten.

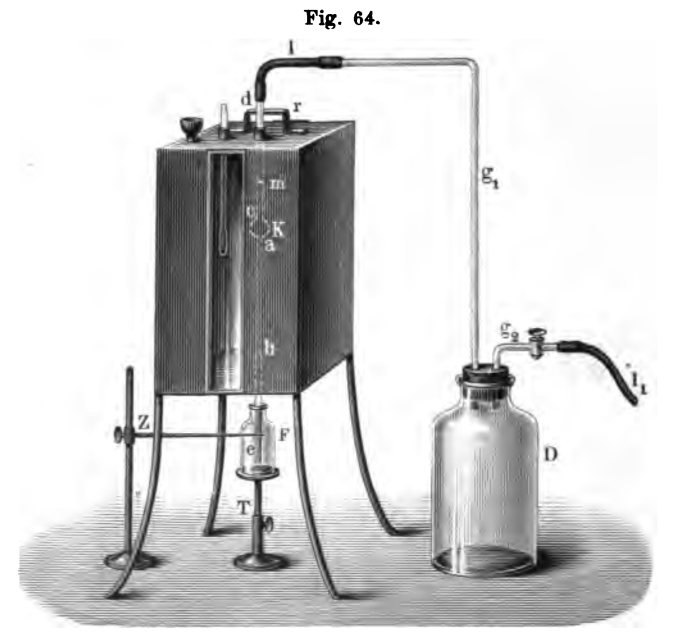
Gebraucht wird: Apparat für Durchfluss, Fig. 64, mit Capillarröhren von verschiedenen Dimensionen; Flaschen *F*; Chronoskop; Pyknometer; Lösungen von NaCl (7- und 12 proc.) und NH_4NO_3 (20- und 40 proc.).

Einleitung. Fliesst eine Flüssigkeit aus einer engen Oeffnung, so ist (S. 101) ihre Ausflussgeschwindigkeit *v*:

$$v = \sqrt{2gh},$$

wo *h* die Druckhöhe bezeichnet, unabhängig von ihrer Natur. Setzt man aber an die Oeffnung ein langes horizontales Rohr, so fliesst die

Fig. 64.



Flüssigkeit durch dasselbe langsamer aus. Die näher der Axe gelegenen, schneller fliessenden Schichten der Flüssigkeit erfahren durch die innere Reibung an den näher der Wand gelegenen, langsamer fliessenden bezw. ruhenden Schichten eine Verzögerung. Die durch das Rohr fliessende Flüssigkeitsmenge hängt von dem Drucke und der

Reibung ab. Die Reibung selbst ist bestimmt durch die Dimensionen (Länge und Radius) des Rohres und die Natur der Flüssigkeit. Ist das Rohr im Verhältniss zu seiner Länge sehr eng, hat es einen kreisförmigen Querschnitt von dem Radius r, die Länge l, und ist der Druck p, so ist in erster Annäherung das während der Zeit z ausfliessende Flüssigkeitsvolumen V:

$$V = \frac{\pi}{8\eta} \frac{p r^4}{l} z \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Das ausfliessende Volumen ist direct proportional der vierten Potenz des Radius, aber umgekehrt proportional der Länge und einer Constanten η, dem inneren Reibungs- oder Viscositätscoëfficienten. $1/\eta$ heisst der Fluiditätscoëfficient:

$$\eta = \frac{\pi p r^4}{8 V l} z \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Stellen wir alle Versuche mit demselben Rohre an, lassen stets dasselbe Volumen V ausfliessen, und bleibt der Druck p der gleiche, so ist:

$$\eta = a \,.\, z,$$

wo a eine nur von den Dimensionen des Rohres und dem Drucke abhängige Constante bedeutet.

Bestimmen wir mit demselben Rohre für dasselbe Volumen bei demselben Drucke die Ausflusszeiten z_1 und z_2 zweier Flüssigkeiten mit den Reibungscoëfficienten η_1 und η_2, so ist: $\eta_1 : \eta_2 = z_1 : z_2$. Kennt man etwa den Reibungscoëfficienten η_1 für die eine der beiden Flüssigkeiten, so ergiebt sich aus einer solchen Bestimmung η_2; es ist:

$$\eta_2 = \eta_1 \,.\, z_2 / z_1.$$

Als specifischen Reibungscoëfficienten bezeichnet man die Zeit, die eine Flüssigkeit braucht, um durch eine Capillarröhre zu fliessen, wenn ein gleiches Volumen Wasser von bestimmter Temperatur durch dieselbe Röhre in der Zeit Eins fliessen würde.

Apparat nach Arrhenius (Fig. 64). An das untere Ende einer verticalen Capillarröhre ab ist eine weitere Röhre be angesetzt, an das obere Ende eine Kugel K angeblasen, an die selbst wieder ein weiteres Glasrohr cd angesetzt ist, das unmittelbar oberhalb K bei c etwas verengt ist. Ueber das Ende d wird ein Schlauch l geschoben, der dasselbe mit einer Glasröhre g_1 verbindet, die in das Innere der Flasche D reicht; an eine andere Röhre, die durch den D verschliessenden Stöpsel geht, ist ein Hahn g_2 angeschmolzen, der mit einem Schlauche l_1 verbunden ist. Unter das Ende e der Röhre be setzt man eine Flasche F, die auf einem Tische T steht, den man hoch und niedrig stellen kann.

Die Capillarröhre befindet sich in einem parallelepipedischen Messingkasten (Höhe 34 cm, Seite der Basis 14 cm), in dessen Vorder- und Hinterwand Fenster eingesetzt sind. Die Röhre de ist in einem

am Boden befindlichen Tubulus mittelst eines Korkes befestigt. Auf das Messinggefäss ist ein Deckel aufgesetzt, in welchem sich drei Löcher für das Rohr *cd* und die einen Rührer *r* tragenden Stäbe, sowie zwei Tubuli befinden; in den einen wird das Thermometer eingesetzt, der andere dient zum Eingiessen von kaltem oder heissem Wasser. Neben dem Tischchen *T* steht ein Messingstab, auf dem sich ein horizontaler Zeiger *Z* verschieben lässt. Die zu untersuchenden Flüssigkeiten werden in gleich weite Flaschen gegossen.

Uebung 1. Die Gesetze für die Ausflusszeiten werden für destillirtes Wasser mit verschieden weiten und verschieden langen Röhren geprüft, die in Korke eingesetzt sind, welche in den Tubus am Boden dss Gefässes passen. Die Längen der Röhren werden an einem Maassstabe gemessen, die Radien derselben und das Volumen der Kugeln durch Auswägen mit Quecksilber bestimmt (S. 57).

1) Man filtrirt die zu untersuchende Flüssigkeit sorgfältig in eine der Flaschen *F*; die Flüssigkeit darf keine Staubtheilchen etc. enthalten, da diese sich in den Capillarröhren festsetzen und dadurch die Ausflusszeit vergrössern können.

2) Man stellt die Flasche auf den Tisch *T*, den man verstellt, bis die Flüssigkeitsoberfläche mit dem Zeiger *Z* zusammenfällt.

3) Man saugt am Schlauch l_1, schliesst den Hahn g_2, lässt die Flüssigkeiten in die Höhe steigen, etwa bis *m*.

4) Man nimmt das Chronoskop in die Hand, öffnet den Hahn g_2, lässt das Chronoskop in dem Moment angehen, in dem die Flüssigkeitsoberfläche an der Verengung bei *c* vorbeigeht und hält es wieder an, wenn sie an *a* vorbeigeht. Man liest die Zeit ab, die dazu nöthig ist, sie sei *z*.

Die Uebung wird zwei- bis dreimal wiederholt.

Uebung 2. Die Reibung verschiedener Salzlösungen wird untersucht. Man lässt nach Ausführung von Uebung 1 alles Wasser ausfliessen, spült dann mit der verdünntesten Lösung des Salzes durch etwa zweimaliges Einsaugen und Ausfliessenlassen die Röhre aus, ehe man eine Messung anstellt, dann nimmt man die nächst concentrirtere Lösung und so fort. Zwischen der Untersuchung von Lösungen verschiedener Salze spült man mit destillirtem Wasser aus.

1) bis 4) wie 1) bis 4) bei Uebung 1.

5) Man bestimmt die Dichte *s* der Flüssigkeit mit dem Pyknometer.

Die Uebung wird ausgeführt: a) bei niederer Temperatur 1) mit Wasser, 2) mit einer circa 7 procentigen und einer concentrirteren Chlornatriumlösung, 3) mit einer 20- und einer 40 procentigen Ammoniumnitratlösung; b) bei circa 30 bis 40° für dieselben Flüssigkeiten.

Berechnung. Bei den Messungen ist der Druck *p* während eines jeden Versuches veränderlich, er ist gleich der Höhe der Flüssig-

keitssäule im Capillarrohr über dem Niveau derselben in der Flasche F, multiplicirt mit der Dichte der Flüssigkeit. Er ändert sich aber für alle Substanzen in gleicher Weise während des Ausfliessens; ist c eine Constante und s die Dichte, so ist der mittlere Druck während des Versuches $p = c . s$. Ist aber bei den Versuchen mit verschiedenen Flüssigkeiten der Druck p verschieden, so folgt aus Gleichung 2): $\eta = b z p$, wo b eine Constante ist. Also:

$$\eta = b \,.\, c \,.\, s \,.\, z,$$

der Reibungscoëfficient ist proportional dem Product aus Dichte und Ausflusszeit.

Stellt man Beobachtungen an zwei verschiedenen Flüssigkeiten mit derselben Röhre an, so ist:

$$\eta_1 : \eta_2 = s_1 z_1 : s_2 z_2.$$

Beispiel:		Wasser	NaCl		NH_4NO_3	
			ca. 7 Proc.	ca. 12 Proc.	ca. 20 Proc.	ca. 40 Proc.
	s	1	1,051	1,090	1,085	1,179
$t = 14{,}5^0$	z	252	266	284	212	222
	$s . z$	252	280	310	230	262
$t = 35^0$	z	164	176	191	151	166
	$s . z$	164	185	208	164	196

Aus den Versuchen mit diesen Flüssigkeiten ergiebt sich:

1) Bei Wasser und bei Lösungen nimmt mit zunehmender Temperatur die Reibung ab, also die Fluidität zu.

2) Chlornatriumlösungen besitzen eine um so grössere Zähigkeit, je concentrirter sie sind. Bei Ammoniumnitratlösungen nimmt die Zähigkeit bis zu einer bestimmten Concentration ab, sie ist also kleiner als die des reinen Wassers, und nimmt dann wieder zu. Bei höheren Temperaturen liegt das Minimum der Zähigkeit bei geringeren Concentrationen und ist weniger ausgesprochen.

Allgemeines. Die Reibung der Flüssigkeiten nimmt mit der Temperatur ab.

Setzt man zu einer Flüssigkeit eine andere, so ändert sich der Reibungscoëfficient in einer noch nicht zu berechnenden Weise.

Besonders eingehend ist das Verhalten der Salzlösungen untersucht worden, theils um die innere Reibung selbst kennen zu lernen, theils auch wegen ihrer Beziehungen zu der elektrischen Leitfähigkeit.

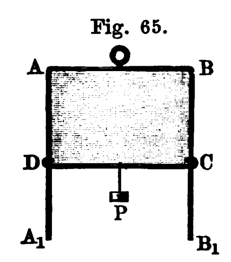
Durchgreifende einfache Beziehungen zwischen der chemischen Zusammensetzung und den Reibungscoëfficienten haben bei ungemischten Flüssigkeiten sich noch kaum ergeben.

IX. Capillarität.

Gebraucht wird: Weite Glasröhre; Seifenlösung; Kork; Drahtgestell, Fig. 65, mit Waagschale und Gewichten; Maassstab; würfelförmiger Trog; Glasscala mit Glasfaden; zwei Gummiringe; Capillaren von 0,1 bis 0,2 mm lichter Weite; Stativ mit Feinverstellung; Mikroskop mit Ocularmikrometer; Scala von bekanntem Theilungswerthe; Spiegelglasplatte; fein ausgezogene Glasröhre; Mikroskop mit Ocularmikrometer bezw. kleines Kathetometer; Pipette mit angeschmolzenen Capillaren; kleines Becherglas; Waage und Gewichte.

Die Molecüle einer Flüssigkeit üben auf einander Kräfte aus, die sich aber nur in sehr kleinen Entfernungen von den Oberflächen bemerkbar machen. Durch diese Kräfte sind die Erscheinungen der sogen. Oberflächenspannung, die Capillarerscheinungen etc. bedingt. Quantitativ sind dieselben bestimmt durch die sogen. Capillaritätsconstante α oder $H = 2\,\alpha$. Diese Grösse ist die zur Ausbildung von 1 qcm freier Oberfläche erforderliche Arbeit, hat also die Dimension einer Energie pro Flächeneinheit.

Fig. 65.



In jeder freien Oberfläche [1]) ist eine Spannung von bestimmter Grösse vorhanden, welche die Oberfläche zu verkleinern sucht, die freie Oberfläche gleicht in mancher Hinsicht einer gespannten Kautschukmembran. Es sei AA_1 BB_1 (nach Quincke) (Fig. 65) ein Gestell aus dünnem Eisendraht, DC sei ein Bügel von der Länge b, der längs AA_1 und BB_1 gleitet. Bringt man zwischen AB und DC etwas Seifenlösung, so kann man an DC ein Gewicht P hängen, ohne dass die Lamelle reisst.

Da die Lamelle zwei freie Oberflächen hat, so ist, wenn α die Oberflächenspannung [2]) in Grammgewicht pro Centimeter Länge bedeutet:

$$P = 2\,\alpha b.$$

Kommt eine Flüssigkeit mit einem festen Körper in Berührung, so findet zwischen ihren an einander stossenden Theilen eine Wechselwirkung statt. Je nach der relativen Grösse dieser im Verhältniss zu derjenigen zwischen den Flüssigkeitstheilchen selbst benetzt die Flüssigkeit den Körper oder thut dies nicht. Benetzt die Flüssigkeit die feste

---

[1]) Die Spannung an einer Oberfläche ist bedingt durch die beiden in ihr zusammenstossenden Medien.

[2]) Statt α wird auch wohl T (Tension) geschrieben.

Wand, so steigt sie an ihr in die Höhe (Fig. 66), die Flüssigkeitsoberfläche AB ist concav gekrümmt.

Benetzt die Flüssigkeit den Körper nicht, so senkt sich ihre Oberfläche an der festen Wand, sie ist convex gekrümmt, Fig. 67.

Fig. 66.

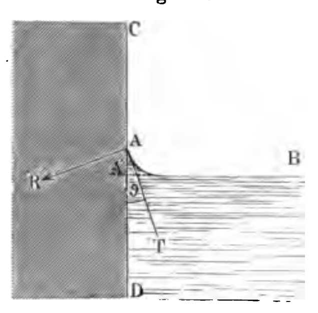
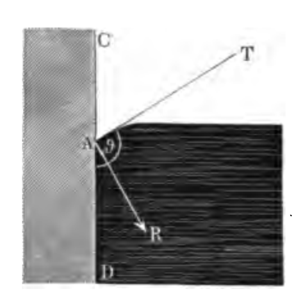


Fig. 67.

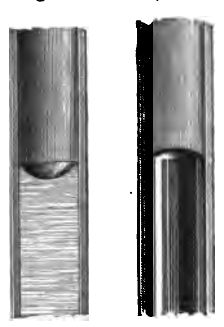


Von besonderem Interesse ist die Kenntniss des Winkels ϑ, unter dem die Tangente AT an die Flüssigkeitsoberfläche die Wand des festen Körpers schneidet.

Für vollkommen benetzende Körper ist $\vartheta = 0$, für benetzende überhaupt ist $\vartheta < 90^0$ und für nicht benetzende ist $\vartheta > 90^0$.

Für vollkommen benetzende Flüssigkeiten ist ferner die Capillaritätsconstante α das Flüssigkeitsgewicht, welches von der Einheit der Länge der Schnittlinie der Flüssigkeitsoberfläche mit dem festen Körper getragen wird [1]).

Fig. 68. Fig. 69.



Besonders wichtig sind diejenigen Erscheinungen, welche eintreten, wenn eine enge Röhre, Haarröhrchen, Capillarröhre, in eine Flüssigkeit taucht. Eine die Röhre benetzende Flüssigkeit steigt in ihr über das Niveau der letzteren in die Höhe, eine sie nicht benetzende sinkt unter dasselbe hinab, und zwar um so mehr, je enger das Rohr ist. Die Oberfläche der Flüssigkeit im Rohre, der Meniscus, ist im ersten Falle concav (Wasser, Fig. 68), im zweiten Falle convex (Quecksilber, Fig 69).

I. Nachweis und Messung der Oberflächenspannung.

a) Nachweis der Oberflächenspannung.

Uebung 1. Man bläst aus einem etwas weiten Glasrohre eine Seifenblase. Entfernt man den Mund, so zieht sich die Blase zu-

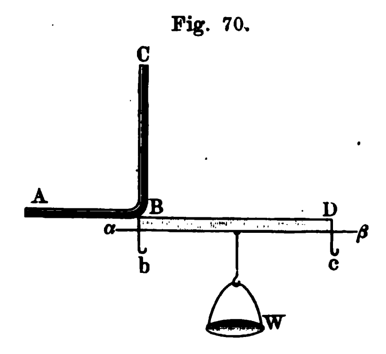
[1]) Meist wird die Länge in Millimetern, das Gewicht in Milligrammen angegeben, die Capillaritätsconstante ist α mgr (Gewicht)/mm. Um aus diesem Werthe von α denjenigen im absoluten Maasssystem Dynen/cm zu erhalten, muss man mit 9,81 multipliciren.

sammen, der dabei austretende Luftstrom bläst eine Kerzenflamme zur Seite.

b) Bestimmung der Grösse der Oberflächenspannung. Der Methode liegen die S. 120 gegebenen Erörterungen zu Grunde.

Apparat: An einem rechtwinkligen gebogenen Draht ABC (Fig. 70) ($AB = 10$ cm) ist ein dünner Draht $BD = 10$ cm und an ihn zwei Drähte Bb und Dc ($Bb = 1{,}5$ cm) angelöthet. Die letzteren sind unten zu kleinen Haken umgebogen. Auf Bb und Dc gleitet der Draht $\alpha\beta$, an den eine Waagschale angehängt werden kann.

Fig. 70.



Uebung. 1) Man steckt AB in einen Kork und dreht ABC, so dass BC also auch Bb und Dc horizontal liegen.

2) Man legt den Draht $\alpha\beta$ nahe an BD und streicht mit einem in Seifenlösung getauchten Pinsel über das Rechteck $BD\alpha\beta$ hin.

3) Man dreht an C das ganze Drahtgestell, bis die Seifenlamelle vertical steht und legt vorsichtig auf die Waagschale Gewichte, bis die Lamelle reisst. Durch Ausprobiren der Neigung gegen die Horizontale bewirkt man, dass $\alpha\beta$ sich parallel BD verschiebt.

4) Man bestimmt das Gewicht von $\alpha\beta$ und der Waagschale und das Gewicht, bei dem eben die Lamelle reisst.

5) Man misst die Länge BD und berechnet nach S. 122 daraus die Oberflächenspannung.

Beispiel: Gewicht des Drahtes und der Waagschale 310 mgr, aufgelegte Gewichte 190 mgr, gesammte Tragfähigkeit 500 mgr. Länge der Lamelle 84 mm $\alpha = \frac{500}{2.84} = 2{,}97$ mm mgr sec^{-2}/mm $= 0{,}0297$ gr/cm.

II. Bestimmung von α durch Steighöhen.

In einem Capillarrohr vom Radius r, das in einem Gefässe steht, welches mit Flüssigkeit von dem specifischen Gewichte s gefüllt ist, steigt oder sinkt die Flüssigkeit um eine Höhe h gegen das Niveau der umgebenden Flüssigkeit. Dabei ist

$$h = 2\,\alpha \cos\vartheta / r s,$$

woraus folgt:

$$\alpha \cos\vartheta = \tfrac{1}{2} r h s,$$

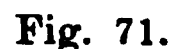
wo ϑ der oben definirte Randwinkel ist.

Die Steighöhe h ist umgekehrt proportional dem Radius r des Rohres. Ist in zwei communicirenden Röhren von den Radien r_1 und r_2 die Höhendifferenz der Flüssigkeit h, so ist

$$\alpha \cos\vartheta = \tfrac{1}{2}(r_1 - r_2) h s.$$

a) Benetzende Flüssigkeiten.

Apparat: Zur Aufnahme der Flüssigkeiten dient (Fig. 71) ein würfelförmiger Trog *W* aus Spiegelglasplatten von 5 cm Seite, der auf einem verstellbaren Tischchen *T* steht. Die frisch ausgezogenen Capillarröhren von ca. 0,1 bis 0,2 mm Weite werden auf einer Glasscala *S*


Fig. 71.



mittelst eines Gummiringes *G* so befestigt, dass sie unten etwas über dieselbe hervorragen. An der Scala ist unten ein umgebogener Glasfaden γ L-förmig angeschmolzen.

Uebung 1. Bestimmung der Steighöhen. 1) Man bestimmt die der Theilung an der Scala entsprechende Höhe x_0 der Spitze γ, indem man einen aus zwei Spiegelglasplatten zusammengekitteten Glaswinkel *V* von 90° oder ein rechtwinkeliges Prisma mit seiner einen Fläche auf die Scala legt, mit der anderen an die Spitze anlegt. Bei einer auf Spiegelglas geritzten Scala bringt man die Spiegelbilder von Auge und Spitze beim Ablesen zur Deckung.

2) Man taucht die von einem Stativ *E* gehaltene Glasscala mit dem

Capillarrohre in die Flüssigkeit ein und hebt und senkt sie ein paar mal, damit die Capillarröhre vollständig benetzt wird.

3) Man stellt die Scala so, dass die Spitze gerade die Oberfläche von unten berührt; es fällt dann das von unten gesehene Spiegelbild von γ gerade mit γ zusammen (zweckmässig hat das die Scala tragende Stativ eine feine Verstellung).

4) Man hebt die Capillarröhre allein ein wenig, lässt die Flüssigkeit zur Ruhe kommen und liest die Höhe x_1 der Flüssigkeit auf 0,1 mm genau ab. Die Steighöhe ist dann $h = x_1 - x_0$.

Fig. 72.



Uebung 2. Bestimmung der Weite der Capillarröhre. Dieselbe geschieht mittelst des Ocularmikrometers durch Vergleichung mit einer gegebenen Theilung.

1) Man legt unter das mit einem Ocularmikrometer versehene Mikroskop eine in $\frac{1}{n}$ mm getheilte Scala und bestimmt, wie viel Theile z dieser Theilung mit einer Anzahl a von Theilen des Ocularmikrometers zusammenfallen, dann entspricht ein Theil des Ocularmikrometers

$$\mu \text{ mm} = \frac{z}{n\,a} \text{ mm}.$$

2) Man schneidet von der Capillarröhre an der Stelle x_1 ein Stück von ca. 5 mm Länge ab und klebt es mit Klebwachs auf einen Objectträger vertical so auf, dass es selbst und sein Spiegelbild in einer geraden Linie zu liegen scheint.

3) Man misst mit dem Ocularmikrometer mehrere um gleiche Winkel abstehende Durchmesser $d = 2r$ und nimmt das Mittel $r = \frac{d}{2}$ aus denselben.

Beispiel: Wir untersuchen nur vollkommen benetzende Flüssigkeiten; bei ihnen ist $\vartheta = 0$, $\cos\vartheta = 1$, und aus den Steighöhen, die zunächst $\alpha \cos\vartheta$ geben, erhält man α selbst. Wasser: $x_0 = 122{,}35$, $x_1 = 195{,}95$, $h = x_1 - x_0 = 72{,}60$ mm, $\mu = {}^1/_{36}$ mm; $2 = 13$ Sc. $= {}^{13}/_{36}$ mm, woraus folgt $\alpha = {}^1/_2 rhs = 6{,}56$. Alkohol: $s = 0{,}82$, $h = x - x_0 = 46{,}85$, $2r = {}^{10}/_{36}$ mm, $\alpha_2 = 2{,}66$.

b) Nichtbenetzende Flüssigkeiten.

Ein U-Rohr mit weitem und engem Schenkel wird auf der Glasscala befestigt und die Differenz b der Kuppen abgelesen. Sonst wird wie bei a) verfahren. Da bei den nichtbenetzenden Flüssigkeiten der Randwinkel nicht Null ist, so muss dieser besonders bestimmt werden.

3. Bestimmung aus der Gestalt von Tropfen oder Blasen.

Liegt ein Tropfen einer nicht benetzenden Flüssigkeit auf einer horizontalen Ebene (Fig. 73), oder befindet sich in einer benetzenden

Flüssigkeit eine Luftblase unter einer ebenen Fläche (Fig. 74) und ist T die Gesammthöhe des Tropfens, t der verticale Abstand zwischen der breitesten Stelle des Tropfens und der Kuppe, so ist

$$t = \sqrt{\frac{2\alpha}{s}} \qquad T = \sqrt{\frac{2\alpha}{s}(1 - \cos\vartheta)}$$

und

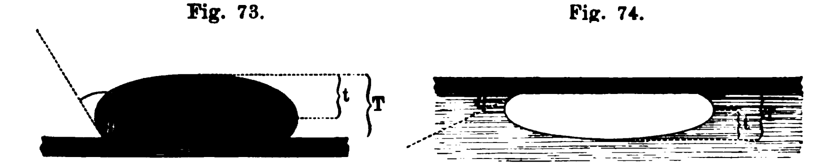
$$\alpha = \frac{st^2}{2} \qquad \cos\frac{\vartheta}{2} = \frac{1}{\sqrt{2}}\,\frac{T}{t}.$$

Bei vollkommen benetzenden Flüssigkeiten genügt die Messung von t.

Uebung 1. Benetzende Flüssigkeiten (Luftblase im Wasser). 1) Man stellt den vollkommen gefüllten Würfeltrog (S. 123) so auf, dass seine obere Fläche horizontal liegt.

2) Man legt auf sie eine ebene Glasplatte, die man so schiebt, dass an einer Ecke ein kleines Stück Flüssigkeitsoberfläche unbedeckt bleibt.

Fig. 73. Fig. 74.



3) Man bläst mittelst eines zu einer feinen langen Spitze ausgezogenen Glasrohres so viel Luft unter P, bis eine Luftblase von ca. 2 cm Durchmesser entsteht.

4) Man misst die Höhen T und t mittelst des mit dem Ocularmikrometer versehenen Mikroskopes, das um eine horizontale Axe drehbar ist, oder mit einem Kathetometer. Im ersteren Falle muss man den Scalenwerth wie oben bestimmen.

Uebung 2. Nichtbenetzende Flüssigkeiten (Quecksilbertropfen). 1) Man misst die Höhen t und T.

4. Bestimmung von α aus der Zahl der Tropfen, die von einer gegebenen kreisförmigen Fläche abtropfen.

Princip: Das Maximalgewicht eines Tropfens (Fig. 75 a. f. S.) an einer horizontalen kreisförmigen Fläche vom Radius r mm, ist bei vollkommen benetzenden Flüssigkeiten

$$g = 2\pi r\alpha.$$

Lässt man gleiche Volumina V zweier Flüssigkeiten 1 und 2 vom specifischen Gewicht s_1 und s_2 von derselben Fläche abtropfen und bestimmt die Zahlen der Tropfen z_1 und z_2, so ist

$$z_1 g_1 = s_1 V = z_1 2\pi r\alpha_1 \qquad z_2 g_2 = s_2 V = z_2 2\pi r\alpha_2,$$

also

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\alpha_2 s_1}{\alpha_1 s_2}.$$

Ist etwa für Wasser $\alpha_1 = 7{,}45$, $s_1 = 1$, so findet man

Fig. 76. Fig. 75.



a_1 a_2

$$\alpha_2 = 7{,}45 \,.\, s_2 \frac{z_1}{z_2}.$$

Apparat. An eine Pipette (Fig. 76), die bei a_1 und a_2 Marken trägt, ist eine unten abgeschliffene Capillarröhre von ca. 6 mm äusserem Durchmesser angeschmolzen.

Uebung. 1) Man saugt in die Pipette Flüssigkeit. 2) Man zählt die Zahl der Tropfen, während die Flüssigkeitsoberfläche von a_1 bis a_2 sinkt.

Allgemeines. Man kann die Capillaritätsconstante α zur Bestimmung des Moleculargewichtes benutzen. Ist Θ die kritische, T die Beobachtungstemperatur, M das Moleculargewicht, d die Dichte, also $v = M/d$ das Molecularvolumen, so ist nach Eötvös

$$\alpha v^{2/3} = 0{,}227\,(\Theta - T).$$

$$M = d \sqrt{\left\{\frac{0{,}227\,(\Theta - T)}{\alpha}\right\}^3}.$$

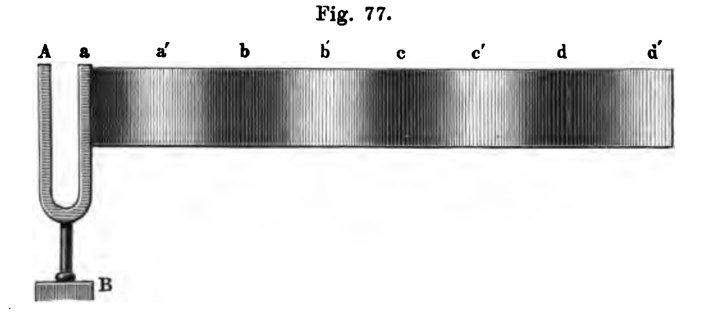
X. Akustische Bestimmungen.

1. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit durch Interferenz.

Gebraucht wird: Interferenzrohr (Fig. 78); Kundt'sches Rohr; König'sche Kapsel (Fig. 80); Glasstäbe, deren Longitudinaltöne einen Dur-Accord geben; z. B. solche von 150, 120, 100, 75 cm Länge, Korkfeilicht: wollener Lappen; Maassstab.

Einleitung. Schwingt ein fester Körper, z. B. eine Stimmgabel, so verdichtet und verdünnt er abwechselnd die ihn umgebende Luft. Diese Verdichtungen und Verdünnungen schreiten durch die Luft fort (Fig. 77), so dass in jeder Richtung an jeder Stelle Verdichtungen und

Fig. 77.



Verdünnungen auf einander folgen. Sie bilden longitudinale Wellen. Man kann dieselben mit den auf einander folgenden Wellenbergen und Wellenthälern bei der Auf- und Abbewegung der Wassertheilchen der transversalen Wasserwellen parallelisiren. Treffen diese Schwingungen der Luft das Ohr in bestimmter Anzahl in der Zeiteinheit, so erzeugen sie die Empfindung des Tones. Die Zahl der Impulse in der Zeiteinheit, d. h. die Schwingungszahl z des tönenden Körpers bestimmt die Tonhöhe. $T = 1/z$ ist dann die Dauer einer Schwingung, die Schwingungsdauer, d. h. die Zeit eines Hin- und Herganges des schwingenden Theilchens. Die Bewegung schreitet während einer Schwingung um die Wellenlänge λ, d. h. um den Abstand zwischen zwei auf einander folgenden Wellenbergen oder Wellenthälern, maximalen Verdichtungen oder maximalen Verdünnungen, fort. Ist u

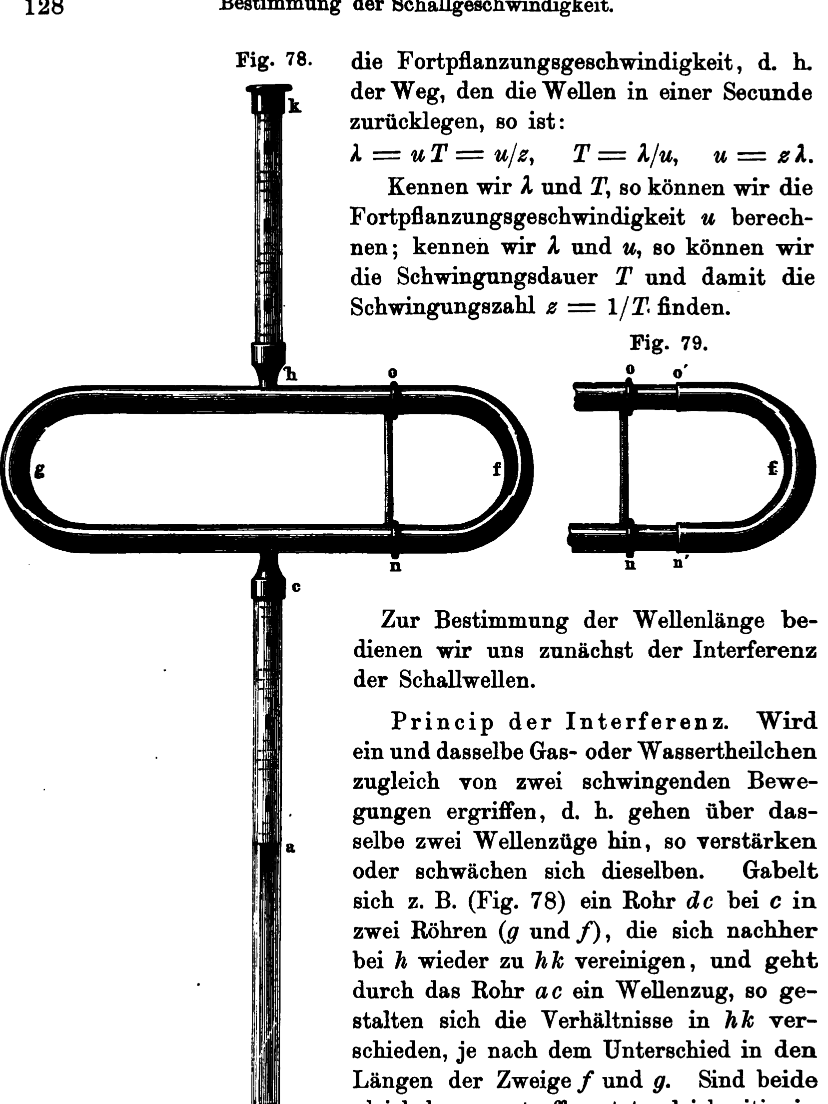
Fig. 78.

die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, d. h. der Weg, den die Wellen in einer Secunde zurücklegen, so ist:

$\lambda = u\,T = u/z, \quad T = \lambda/u, \quad u = z\,\lambda.$

Kennen wir λ und T, so können wir die Fortpflanzungsgeschwindigkeit u berechnen; kennen wir λ und u, so können wir die Schwingungsdauer T und damit die Schwingungszahl $z = 1/T$ finden.

Fig. 79.



Zur Bestimmung der Wellenlänge bedienen wir uns zunächst der Interferenz der Schallwellen.

Princip der Interferenz. Wird ein und dasselbe Gas- oder Wassertheilchen zugleich von zwei schwingenden Bewegungen ergriffen, d. h. gehen über dasselbe zwei Wellenzüge hin, so verstärken oder schwächen sich dieselben. Gabelt sich z. B. (Fig. 78) ein Rohr dc bei c in zwei Röhren (g und f), die sich nachher bei h wieder zu hk vereinigen, und geht durch das Rohr ac ein Wellenzug, so gestalten sich die Verhältnisse in hk verschieden, je nach dem Unterschied in den Längen der Zweige f und g. Sind beide gleich lang, so treffen stets gleichzeitig in h die Wellenberge (Verdichtungen) aus f und g und die Wellenthäler (Verdünnungen) aus f und g oder allgemein gleiche Bewegungszustände zusammen; die beiden Wellen aus f und g verstärken sich. Ist dagegen f um so viel länger als g, dass, wenn ein von c ausgegangener Wellenberg durch f in h anlangt, die dem vorhergehenden Wellenthal in c entsprechende

Bewegung durch g in h anlangt, so sind die beiden Bewegungen entgegengesetzt, sie heben sich auf; ist f dagegen um so viel länger, dass, wenn ein Wellenberg durch g in h anlangt, die dem vorhergehenden Wellenberg entsprechende Bewegung in c durch f in h ankommt, so verstärken sie sich. Dieser Längenunterschied der beiden Canäle f und g sei λ; der bei der vorhergehenden Betrachtung sich ergebende Längenunterschied ist dann $^1/_2\,\lambda$; λ ist die gesuchte Wellenlänge.

Solche Erscheinungen beim Zusammentreffen mehrerer Wellensysteme nennt man Interferenzen; sie treten in gleicher Weise bei den Schall- und Lichtwellen wie bei den elektrischen Wellen und Wasserwellen auf.

Bestimmung der Wellenlänge λ.

Apparat. Vor das Rohr cd des Apparates (Fig. 78) stellt man eine Tonquelle, etwa einen durch loses Reiben mit einem feuchten Lappen in Longitudinalschwingungen versetzten Stab ab, der an seinem Ende a einen Kork trägt und in der Mitte bei d festgeklemmt ist. Mit h verbindet man entweder ein Rohr hk, in dem sich Korkfeilicht befindet, oder einen Schlauch, der zu einer König'schen Kapsel mit Gasflamme (Fig. 80) führt. Bei letzterer setzen die nach o fortgepflanzten Druckschwankungen die den Raum b abschliessende Membran in Bewegung; dadurch wird der Gaszufluss aus g abwechselnd vermehrt und vermindert und die Gasflamme über s geräth in Zuckungen.

Fig. 80.

Das Rohr f kann durch Ausziehen verlängert werden, da es die aus Fig. 79 ersichtliche Construction besitzt; auf dem festen Stück ist eine Millimetertheilung angebracht.

Uebung. 1) Man streicht den Stab und sieht, wie bei vollkommen zusammengeschobenen Röhren die Flamme lebhaft flackert, eventuell ausgeblasen wird (das Korkfeilicht sich lebhaft bewegt).

2) Man zieht die Röhre aus, die Flamme wird ruhiger und brennt zuletzt ganz ruhig.

3) Man misst die Strecke, um die man das Rohr ausgezogen hat, wenn Ruhe eintritt, dieselbe giebt verdoppelt den Zuwachs an Weg, welcher nöthig ist, damit die Schwingungsbewegung auf der einen Seite einen Weg von $^1/_2\,\lambda$ mehr durchlaufen muss, als auf der anderen.

4) Man zieht weiter aus, die Flamme wird erst unruhig, dann wieder ruhig; man misst die Strecke, bei der wieder Ruhe eintritt, dieselbe giebt verdoppelt $^3/_2\,\lambda$ u. s. f.

5) Man stellt dieselben Versuche für eine Reihe verschiedener Stäbe, die einen Dur-Accord geben, an.

Berechnung. a) Ist die Schwingungszahl des Stabes z, also die Schwingungsdauer $T = 1/z$, so erhält man aus dem beobachteten Werthe $1/2\,\lambda$ die Schallgeschwindigkeit $u = z\,\lambda$.

Bemerkung. In trockener atmosphärischer Luft ist bei 0^0 C. die Schallgeschwindigkeit gleich 331,8 m/sec., rund 330 m/sec., in Luft von t^0 ist $u = 331{,}8\sqrt{1 + 0{,}00367\,t}$ m/sec.

b) Ist die Schallgeschwindigkeit u gegeben, so erhält man aus den gefundenen λ die Schwingungszahlen $z = u/\lambda$.

Allgemeines. Aus Versuchen mit vier Stäben, deren Longitudinaltöne einen Dur-Accord liefern, ergiebt sich, dass bei ihnen die Wellenlängen sich wie 30 : 24 : 20 : 15 verhalten, also die Schwingungszahlen wie 16 : 20 : 24 : 32. Die Schwingungszahlen, welche den Tönen entsprechen, die den Dur-Accord zusammensetzen (Grundton, grosse Terz, Quint und Octav), stehen also in dem einfachen Verhältnisse von 4 : 5 : 6 : 8.

2. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mittelst stehender Wellen.

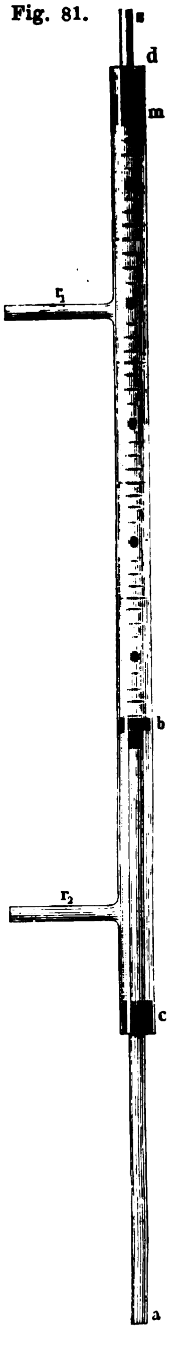
Gebraucht wird: Kundt'sche Röhren mit Glasstäben, Wolllappen, Korkfeilicht, Kieselguhr; Bruchstücke von einem der Glasstäbe; Pyknometer; Waage; Gewichte; Kipp'scher Apparat zur Entwickelung von Kohlensäure.

Princip. Werden Luftwellen am einen Ende einer Röhre, die am anderen Ende durch eine ebene Wand geschlossen ist, erregt, so werden sie an dieser reflectirt. Bei einem bestimmten Verhältnisse der Röhrenlänge zu der Wellenlänge setzen sich die zurückkehrenden reflectirten Luftwellen mit den ankommenden so zusammen, dass alle einzelnen Luftschichten der Röhre sich gleichzeitig in entsprechenden Schwingungszuständen befinden, z. B. gleichzeitig durch die Ruhelage gehen und gleichzeitig die maximale Elongation erreichen; die Grösse dieser Elongation ist an jedem Orte eine andere. Wir erhalten hierbei stehende Schwingungen. Man unterscheidet Schwingungsbäuche und Schwingungsknoten; an den Bäuchen sind die Lufttheilchen in lebhafter Bewegung, die Druckänderungen sind aber Null, an den Knoten sind die Theilchen in Ruhe, aber die Druckänderungen am grössten; am Ende der Röhre befindet sich immer ein Knoten. In den durch einen Knoten getrennten Theilen der Röhre finden die Bewegungen im entgegengesetzten Sinne statt. Bei den stehenden Wellen ist der Abstand l zweier Bäuche oder zweier Knoten l gleich der halben Länge λ der erzeugten Welle; $l = 1/2\,\lambda$ oder $\lambda = 2\,l$. Bringt man einen in der Mitte festgeklemmten Glasstab durch Streichen seiner Länge nach zum Tönen, so ist in ihm eine stehende Longitudinalschwingung vorhanden; dieselbe hat ihren Knoten in der Mitte des Stabes, d. h. da, wo derselbe befestigt ist; an beiden Enden befinden

sich Bäuche; die Länge der Schallwelle im Glase ist also gleich der doppelten Länge des Stabes $= 2L$.

Apparat. Die stehenden longitudinalen Luftschwingungen erzeugt man in einer „Kundt'schen Röhre". Eine etwa 2 cm weite, 130 cm lange Glasröhre *cd*, Fig. 81, ist durch die Stopfen *c* und *m* geschlossen. In *c* ist der Glasstab *ab* so befestigt, dass $ac = cb$. Reibt man den Glasstab *ac* leicht mit einem feuchten wollenen Lappen, so geräth er in Längsschwingungen und giebt einen Ton von der Schwingungszahl *z*. Die Schwingungen des Stabes werden durch den Kork *b*, der an dem Ende des Glasstabes befestigt ist und dessen Querschnitt kleiner als der des Rohres ist, auf die zwischen *b* und *m* enthaltene Luftsäule übertragen. Man macht sie durch eingestreutes feines Korkfeilicht oder besser durch Kieselguhr sichtbar. An den Schwingungsbäuchen werden die leicht beweglichen Theilchen durch die stark bewegte Luft zu feinen Rippen zusammengefegt, wodurch sich eine in der Figur angedeutete Streifung ergiebt, an den Knoten bleiben sie ruhig liegen. Durch Einschieben oder Ausziehen des Korkes *m* mittelst des Glasstabes *s* regulirt man die Länge der schwingenden Luftsäule so, dass die „Staubfiguren" möglichst scharf werden. Die seitlich angesetzten Röhren r_1 und r_2 dienen zum Füllen der Röhre mit verschiedenen Gasen.

Fig. 81.



1. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Luft.

Uebung. 1) Man setzt bei *c* einen Glasstab ein, von dessen Longitudinalton die Tonhöhe, also auch die Schwingungszahl *z* bekannt ist.

2) Man erzeugt den Ton, giebt der Luftsäule durch Ein- oder Ausziehen des Korkes *m* eine solche Länge, dass sich die Schwingungsfiguren möglichst scharf ausbilden, und bestimmt die Länge Λ einer gewissen Anzahl *n* von Knotenabständen *l*. Dann ist $l = \Lambda/n$, $\lambda = 2l$ und $u = z\lambda = 2zl$.

Beispiel: $z = 3750$, $n = 20$, $\Lambda = 88{,}4$ cm. Also $l = 4{,}42$ cm, $\lambda = 8{,}84$, $u = 33150$ cm/sec. $= 331{,}5$ m/sec.

2. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit *U* im Glase.

Princip. Ist *L* die Länge eines Glasstabes, der bei einer Kundt'schen Röhre zur Erzeugung

von Schwingungsfiguren dient, l der Abstand zweier Knoten in der Kundt'schen Röhre bei Erzeugung des Longitudinaltones des Stabes, so ist in Luft $u = z\,2l$ und im Stabe $U = z\,2L$, also ist $U : u = L : l$ oder die Schallgeschwindigkeit im Glase

$$U = 331{,}8\sqrt{1 + 0{,}00367\,t}\;.\;L/l \text{ m/sec.},$$

da $331{,}8\sqrt{1 + 0{,}00367\,t}$ die Schallgeschwindigkeit in Luft bei t^0 ist.

Uebung. 1) Man verfährt wie unter 1. und bestimmt für zwei Glasstäbe $l_1 = \varDelta_1/n_1$ und $l_2 = \varDelta_2/n_2$.

2) Man misst die Längen beider Stäbe L_1 und L_2.

Beispiel: $\varDelta_1 = 89{,}5$ cm, $n_1 = 20$, $l_1 = 4{,}475$ cm; $\varDelta_2 = 69{,}5$, $n_2 = 12$, $l_2 = 5{,}792$; $L_1 = 68{,}0$, $L_2 = 89{,}5^0$; $t = 19{,}5^0$, $U_1 = 5211$, $U_2 = 5298$ m; also circa 16mal grösser als in Luft.

3. Bestimmung des Elasticitätsmoduls durch die Schallgeschwindigkeit.

Princip. Ist U die Schallgeschwindigkeit in einem Körper von dem specifischen Gewichte s, so ist sein Elasticitätsmodul (s. S. 106)

$$E = U^2 s/g,$$

wo g die Beschleunigung durch die Schwere $= 9810$ mm ist. E wird, wenn U in Metern/sec. gegeben ist, in Kilogrammen erhalten für einen Stab von einem Quadratmillimeter Querschnitt.

Uebung. 1) Man bestimmt wie unter 2) U für Glas.

2) Man bestimmt das specifische Gewicht eines Stückchens des Glasstabes, von dem der benutzte geschnitten ist.

Beispiel: $U = 5298$ m/sec., $s = 2{,}201$; also $E = 6295$ kg/qmm.

4. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Kohlensäure.

Uebung. 1) Man lässt aus dem Kipp'schen Apparate Kohlensäure, die man durch Wasser und Schwefelsäure leitet, durch das Rohr r_1 ein- und durch das Rohr r_2 ausströmen.

2) Man bestimmt die Schallgeschwindigkeit wie in 1.

Beispiel: $z = 3750$, $n = 20$, $\varDelta = 70{,}2$ cm; also $\lambda = 7{,}02$ cm, $u = 26\,325$ cm/sec. $= 263{,}25$ m/sec. Temperatur $17{,}8^0$.

3. Bestimmung der Schwingungszahl mit Hülfe des Quincke'schen Apparates.

Gebraucht wird: Apparat Fig. 82, mehrere Stimmgabeln.

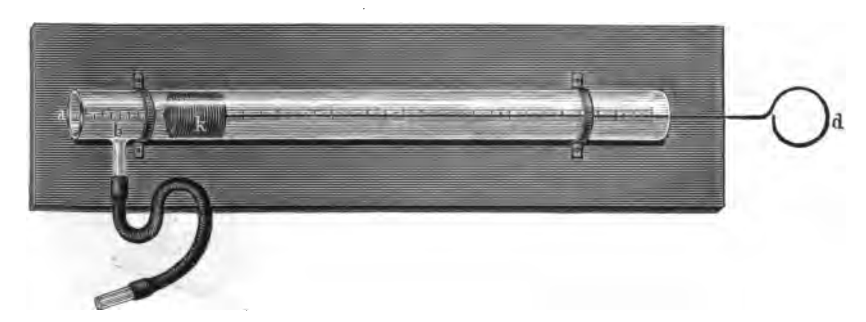
Apparat. Der Apparat (Fig. 82) besteht aus einem $^1/_2$ bis $^3/_4$ m langen Glasrohr, an welchem aussen ein Maassstab angeklebt ist oder das über einer Theilung liegt. In der Nähe des einen Endes a ist ein Ansatzrohr angeschmolzen, von welchem ein Gummischlauch zum Ohre

des Beobachters führt. Innerhalb des Glasrohres bewegt sich, mittelst eines Drahtes *d* verschiebbar, ein Korkstopfen *k*.

Princip. Erzeugt man am Ende *a* der Röhre einen Ton, so tönt die Luftsäule im Glasrohr nur dann kräftig mit, wenn der Abstand von *a* bis zum Kork in einem solchen Verhältniss zur Wellenlänge *l* des Tones steht, dass sich eine stehende Schwingung innerhalb des Rohres ausbildet; dann muss der Abstand des Korkes so gewählt sein, dass bei *a* ein Schwingungsbauch und am Kork ein Schwingungsknoten sich bildet. Die Entfernungen des Korkes von *a* betragen dann $\frac{1}{4}l$, $\frac{1}{4}3l$, $\frac{1}{4}5l$ etc. Für das erste Maximum ist jedoch der Abstand nicht genau $\frac{1}{4}l$, weil einmal ein Theil der Luft vor *a* sich an der Schwingung betheiligt und dann, weil in Folge des Ansatzes das Rohr nicht symmetrisch gebaut ist; dagegen beträgt die Differenz zwischen dem ersten und zweiten oder zweiten und dritten Maximum genau $\frac{1}{2}l$.

Der Ton verschwindet, wenn bei *b* die eintretende Schwingung von der reflectirten gerade aufgehoben wird, d. h. wenn der Abstand

Fig. 82.



des Korkes von *b* $\frac{1}{4}l$, $\frac{1}{4}3l$, $\frac{1}{4}5l$ etc. beträgt. Auch hier giebt das erste Minimum kein genaues Resultat, wohl aber wieder die Differenz zwischen dem ersten und zweiten oder dem zweiten und dritten Minimum.

Sowohl aus den beobachteten Maximis wie den Minimis berechnet sich die Schwingungszahl nach der Formel

$$z = \frac{331{,}8\sqrt{1 + \alpha t}}{l}.$$

Uebung. 1) Man befestigt vor *a* eine Stimmgabel an einem Stativ, so dass die Breitseite ihrer Zinken senkrecht zur Axe des Rohres steht.

2) Man schiebt den Kork *k* ganz in die Nähe von *b* und verschiebt ihn dann, bis man ein Maximum resp. ein Minimum des Tones hört, und liest die Lagen des Korkes an der Theilung ab.

3) Man bildet die Differenzen der Ablesungen für je zwei auf einander folgende Maxima und Minima.

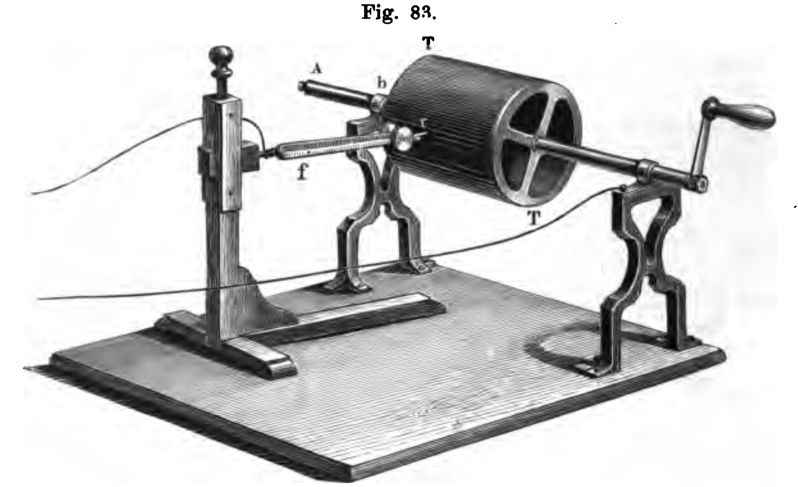
Beispiel: Bei a wird eine Stimmgabel zum Tönen gebracht und k sowohl auf Maxima als Minima eingestellt. Stimmgabel c_3: Maxima bei 76,242,406 und 571 mm, daraus $l/2 = 0{,}165$ m. Minima bei 104,268,432 mm; Abstand von b und a 26 mm, daraus $l/2 = 0{,}164$ m und $z = 1039$. Stimmgabel c_2: Maxima bei 160,491 mm, daraus $l/2 = 0{,}331$ m. Minima bei 185,517 mm, daraus $l/2 = 0{,}332$ m und $z = 516$.

4. Graphische Bestimmung der Schwingungszahl einer Stimmgabel.

Princip. Senkrecht zur Richtung der Schwingungen wird unter der Stimmgabel eine berusste Fläche fortgezogen; die den Schwingungen entsprechende Sinuscurve wird zugleich mit in bestimmten Intervallen entstehenden Zeichen aufgeschrieben.

Apparat und Methode. Eine Trommel (Phonautograph) T wird mit weissem Papier bespannt und durch Drehen an dem Handgriff H

Fig. 83.



über eine russende Petroleumlampe mit Flachbrenner hingezogen und dadurch geschwärzt. Neben der Trommel T wird eine Stimmgabel f, die an ihrem Ende eine kleine Schreibspitze r trägt, aufgestellt und mit dem Bogen erregt. Sie verzeichnet dann auf der rotirenden Trommel eine Curve, Fig. 83. Um die Zahl der Schwingungen in der Secunde zu erhalten, stellt man neben die Stimmgabel eine kleine Kugel, die man mit dem einen Pol eines Inductoriums verbindet, während der andere Pol mit der Trommel verbunden ist. Der primäre Strom des Inductoriums wird eine bestimmte Anzahl von Malen in der Secunde durch ein Pendel schlossen, wobei jedesmal ein Funken von der Kugel zum Papier überspringt, auf dem dann ein weisser Punkt entsteht[1]). Man ermittelt die

[1]) Man kann auch statt von der Kugel die Funken von der Schreibspitze r auf die Trommel überschlagen lassen. Die weissen Punkte E, E_1, E_2, Fig. 84, entstehen dann auf der Sinuscurve selbst.

Zahl z der Schwingungen, die auf n Intervalle zwischen den Punkten kommen; ist dann die Schwingungsdauer des Pendels $1 \cdot x$ Secunde, so ist die Schwingungsdauer der Stimmgabel

$$T = \frac{n}{zx}.$$

Uebung 1. Vergleichung der Schwingungsdauer einer Stimmgabel mit der eines Pendels.

1) Ueber die Bestimmung der Schwingungsdauer des Pendels vergl. S. 37.

2) Das Papier wird auf die Trommel gespannt und berusst. Die Stimmgabel und die Kugel werden neben die Trommel gestellt, das

Fig. 84.



unterbrechende Pendel wird in Bewegung gesetzt, die Stimmgabel angestrichen und die Trommel gedreht.

3) Mit einem Lineal werden parallel zur Axe der Trommel durch (Fig. 84) zwei der weissen Punkte Linien gezogen.

4) Die Zahl der Punkte und der Sinuscurven zwischen den beiden Strichen wird gezählt.

Uebung 2. Vergleichung der Schwingungsdauer einer Stimmgabel mit der bekannten einer anderen Stimmgabel.

1) Neben der Trommel werden die beiden zu vergleichenden Stimmgabeln aufgestellt, von denen die eine zweckmässig elektromagnetisch [1]) erregt wird und sonst wie bei Uebung 1. verfahren.

Bemerkung. Durch eine internationale Conferenz in Wien ist festgesetzt, dass eine Stimmgabel, die bei 15⁰ C. 435 ganze (870 einfache) Schwingungen ausführt, als Normal-a^1-Gabel gelten soll.

---

1) Die elektromagnetische Anregung erfolgt ähnlich wie beim Wagner'schen Hammer.

B. Wärme.

I. Ausdehnung der Körper.

Einleitung.

Erwärmen wir einen Körper, so ändern sich seine linearen Dimensionen und sein Volumen.

Der lineare Ausdehnungscoëffient β_l ist die Aenderung der bei 0^0 gemessenen Längeneinheit für die Temperaturänderung von 1^0.

Der Ausdehnungscoëfficient ist fast bei allen Körpern eine positive Zahl, d. h. fast alle Körper dehnen sich bei steigender Temperatur aus (Ausnahme Wasser), ferner nimmt der Ausdehnungscoëfficient bei fast allen Körpern mit der Temperatur zu. Unter dem mittleren linearen Ausdehnungscoëfficienten zwischen 0^0 und t^0 versteht man die Aenderung der Längeneinheit bei 0^0 für 1^0 unter der Voraussetzung, dass die Ausdehnung in dem ganzen Intervall zwischen 0^0 und t^0 gleichmässig stattfindet. Aendert sich also die Länge eines Stabes von der Länge l bei 0^0 bei einer Temperaturänderung von t_0 bis $t_0 + t$ um λ, so ist für ihn der mittlere lineare Ausdehnungscoëfficient zwischen t_0 und $t_0 + t$:

$$\beta_l = \frac{\lambda}{l \,.\, t}.$$

Der cubische Ausdehnungscoëfficient β_c ist die Aenderung der bei 0^0 gemessenen Volumeneinheit für die Temperaturänderung von 1^0, er ist sehr nahe gleich dem dreifachen linearen, d. h.

$$\beta_c = 3\,\beta_l.$$

Ist d_0 die Dichte des Körpers bei 0^0, d_t bei t^0, so ist, da das Volumen Eins bei 0^0 auf $1 + \beta_c t$ bei t^0 wächst:

$$d_t = \frac{d_0}{1 + \beta_c t} \qquad \beta_c = \frac{d_0 - d_t}{d_t\, t}.$$

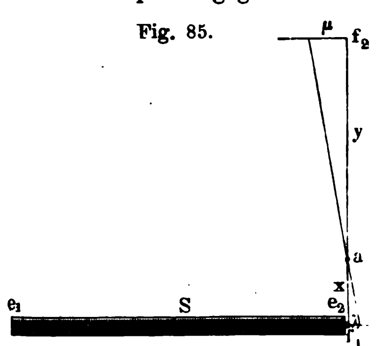
Bei Flüssigkeiten und Gasen kann man nur von cubischen Ausdehnungscoëfficienten sprechen.

1. Bestimmung des Ausdehnungscoëfficienten von Stäben nach der Methode von Lavoisier und Laplace.

Gebraucht wird: Modell zur Erläuterung der Spiegelablesung (Fig. 19); Fernrohr mit Scala; Apparat von Lavoisier und Laplace (Fig. 86) mit Brennern und Wassermantel; Thermometer; $1/_2$ m lange Stäbe von Kupfer, Eisen und Glas.

Princip. Ein Stab S (Fig. 85) von der Länge L liegt mit seinem einen Ende e_1 fest gegen eine verticale Wand, mit seinem anderen e_2 berührt er den einen Endpunkt f_1 eines Fühlhebels, dessen Arme die Längen x und y haben, und der sich um den Punkt a dreht; sein anderes Ende f_2 gleitet längs einer Scala. Verlängert sich der Stab um λ, so verschiebt sich das Ende f_1 um λ und das Ende f_2 um μ, und zwar ist: $\mu = \lambda . y/x$, also $\lambda = \mu . x/y$.

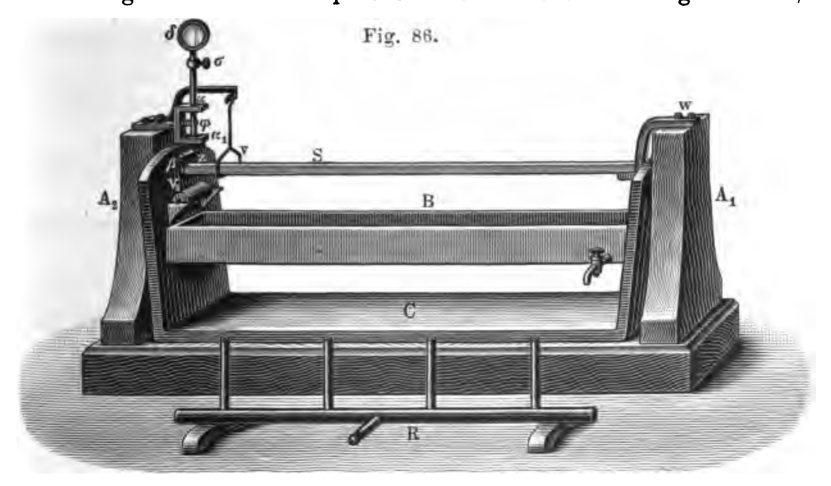
Fig. 85.



Ist x klein und y gross, so ergiebt sich selbst für ein kleines λ schon ein im Verhältniss zu λ grosses μ. — Statt des hier vorausgesetzten geraden Fühlhebels benutzt man bei den Messungen selbst die Spiegelablesung (S. 22).

Apparat (Fig. 86). Zwei Holzböcke, A_1 und A_2, sind auf ein Brett aufgeschraubt. An A_1 ist ein eiserner Winkel w angeschraubt,

Fig. 86.



auf A_2 befindet sich die zur Messung der Längenänderungen dienende Spiegelvorrichtung. Dieselbe besteht aus einer stählernen Axe, die sich in den beiden Lagern α und α_1 dreht und an welcher oben mittelst

der Schraube σ der Spiegel δ befestigt ist, während sich unten ein Arm z mit einem Stift β ähnlich einer Kurbel befindet. Die Mittellinie des nach unten gehenden Stiftes β ist etwa 30 mm von der Axe entfernt, also ist $x = 30$ mm. Eine Feder φ, welche an einem Vorsprung der stählernen Axe angreift, drückt den Stift β nach rechts gegen den Stab S. Von dem Bock A_2 geht noch ein Träger aus, der den Bügel v trägt. Der Metallstab S wird mit dem einen Ende auf den Winkel w, mit dem anderen in den Bügel v gelegt; gegen letzteres drückt der Stift β, wobei w so gebogen sein muss, dass der Hebelarm x senkrecht zur Stabrichtung steht. Ein doppelwandiger Blechkasten C, durch den Wasser fliesst, schützt das Gestell gegen Wärmestrahlung. An seinen Innenwänden sind Messingrollen v_1 und v_2 (in der Figur nicht zu sehen) angebracht, auf die der zur Erwärmung des Stabes dienende Blechkasten B gesetzt wird. Beim Erwärmen wird der Brenner R unter den auf die Rollen $v_1 v_2$ gesetzten Blechkasten B gestellt.

Uebung. 1) Man setzt den Blechkasten B auf die Rollen v_1 und v_2, so dass sich der Stab S innerhalb desselben befindet, und giesst Wasser von der Temperatur der Umgebung hinein.

2) Man löst die Schraube σ an dem Spiegel δ und dreht denselben so, dass seine Normale nach der Stelle hinweist, wo man das Fernrohr mit Scala aufstellen will.

3) Man stellt das Fernrohr auf den Spiegel so ein, dass seine Axe senkrecht zu der Ebene desselben steht und man das Bild der Scala scharf sieht (vgl. S. 26).

4) Man liest die Temperatur $t_1{}^0$ des Wassers in dem Kasten B ab, und den Scalentheil, auf welchen das Fadenkreuz einsteht: Z_1.

5) Man erhitzt, bis das Wasser siedet, wobei der Spiegel durch ein untergelegtes Stück Pappe vor dem Beschlagen zu schützen ist, liest die Temperatur ab resp. entnimmt die Siedetemperatur der Tabelle unter Berücksichtigung des Barometerstandes; sie sei $t_2{}^0$.

6) Man liest den Scalentheil ab, auf den das Fadenkreuz einsteht; er sei Z_2.

7) Man misst den Abstand von Scala und Spiegel y, die Länge des Stabes L und die Länge des Hebels x.

Berechnung. Da der Spiegel sich nur um kleine Winkel dreht, so ist nach S. 23 $Z_2 - Z_1$ sehr nahe gleich dem Bogen, den der reflectirte Strahl beschrieben hat und demnach $^1/_2\,(Z_2 - Z_1)$ der Bogen μ, um den sich die Spiegelnormale gedreht hat. Die Längenänderung, welche der Stab erfahren hat, ist $\lambda = {}^1/_2\,(Z_2 - Z_1)\,.\,x\,y$, also der mittlere Ausdehnungscoëfficient β_l zwischen t_1 und t_2:

$$\beta_l = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(t_2 - t_1)} \cdot \frac{x}{2\,yL}\,.$$

Untersucht werden Kupfer und Glas, event. auch Eisen.

Beispiel: Cu : $t_1 = 13{,}5$; $Z_1 = 250$ mm; $t_2 = 93$; $Z_2 = 317$ mm; $y = 1422$ mm; $x = 30$ mm; $L = 500$ mm; $\beta_l = 0{,}0000167$. Für Fe ergab sich $\beta_l = 0{,}000013$, für Glas 0,0000086. Dies sind die Ausdehnungscoëfficienten zwischen t_1 und t_2, bezogen auf die Längeneinheit bei t_1. Würden wir sie auf die Längeneinheit bei 0^0 beziehen, was der Definition von β_l entspricht, so würden wir doch fast dasselbe Resultat erhalten.

2. Das Gewichtsdilatometer.

Gebraucht wird: Gewichtsdilatometer mit Kupferdrahtöse; Cylinder (Fig. 87); T-Stück mit Hahn und Schlauch; Wasserstrahl-(Saug-)pumpe; Fliesspapier; Wasserbad mit Thermometer und Rührer; Stativ; Benzol.

Princip. Den cubischen Ausdehnungscoëfficienten von Flüssigkeiten bestimmt man entweder im Dilatometer oder dadurch, dass man ein Glasgefäss bei verschiedenen Temperaturen bis zu einer bestimmten Marke mit der Flüssigkeit füllt und das in dem Gefäss enthaltene Gewicht der Flüssigkeit ermittelt. Dabei ist zu beachten, dass auch das Glasgefäss sich ausdehnt. Berücksichtigt man die Ausdehnung desselben nicht, so erhält man nur den scheinbaren Ausdehnungscoëfficienten der Flüssigkeit, berücksichtigt man dieselbe, den wahren.

Ist V_1 das Volumen des Gefässes bei der Anfangstemperatur t_1, P_1 das Gewicht der darin enthaltenen Flüssigkeit, so ist V_1/P_1 das Volumen der Gewichtseinheit derselben bei t_1. Ist der cubische Ausdehnungscoëfficient des Glases α, so ist das Volumen des Gefässes bei t_2^0 gleich $V_2 = V_1\,[1 + \alpha\,(t_2 - t_1)]$. Wiegt die das Gefäss bei t_2^0 erfüllende Flüssigkeit P_2, so ist das Volumen der Gewichtseinheit derselben $V_2/P_2 = V_1\,[1 + \alpha\,(t_2 - t_1)]/P_2$. Die Volumenänderung der Gewichtseinheit beträgt also zwischen t_2^0 und t_1^0:

$$V_1\,[1 + \alpha\,(t_2 - t_1)]/P_2 - V_1/P_1$$

und für 1^0 und bezogen auf das Volumen Eins bei t_1^0:

$$\beta = \frac{P_1}{V_1} \cdot \frac{V_1\,[1 + \alpha\,(t_2 - t_1)]/P_2 - V_1/P_1}{t_2 - t_1} = \frac{P_1\,[1 + \alpha\,(t_2 - t_1)] - P_2}{P_2\,(t_2 - t_1)}.$$

Dies ist der cubische Ausdehnungscoëfficient der Flüssigkeit.

Die Uebungen zerfallen in zwei Theile: 1. Bestimmung des cubischen Ausdehnungscoëfficienten α des Glases mittelst einer Flüssigkeit, deren Ausdehnungscoëfficient β bekannt ist. Wir nehmen Wasser, bei genaueren Bestimmungen nimmt man Quecksilber. 2. Bestimmung des Ausdehnungscoëfficienten irgend einer Flüssigkeit.

Apparat. An das ca. 20 cbcm fassende Glasgefäss A, das Dilatometer, Fig. 87 (a. f. S.), ist eine ca. 1 mm weite Capillarröhre B angesetzt, die sich zu einem kleinen Kugeltrichter C erweitert. Dicht unter dieser Erweiterung trägt der Hals B einen Strich. Zur Füllung dient der Cylinder R mit einem seitlichen Rohre. Durch den Stopfen geht ein Draht zum Niederhalten von A in der Flüssigkeit. Durch das seitliche

Rohr wird der Cylinder mit einem ⊤-Stück verbunden, welches an dem Schenkel v_2 den Hahn h_2 trägt. Der durch den Hahn h_1 verschliessbare Schenkel v_1 wird mit einer Saugpumpe verbunden.

Uebung 1. Bestimmung des cubischen Ausdehnungscoëfficienten des Glases.

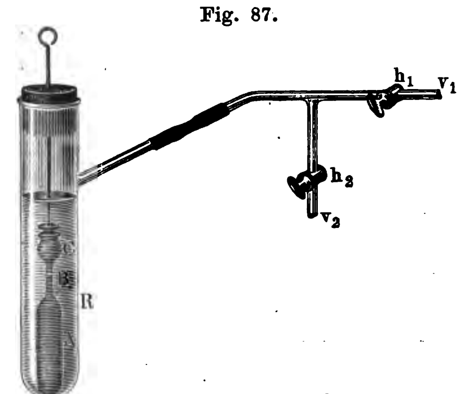
1) Man trocknet das Dilatometer; dazu hängt man es in ein leeres Reagirglas R (Fig. 87), verbindet v_1 mit einer Wasserstrahlpumpe, v_2 mit einem Trockenapparat. Man schliesst h_2 und evacuirt, schliesst h_1, öffnet h_2 und lässt trockene Luft ein, gleichzeitig erwärmt man R.

2) Man wägt das trockene Dilatometer; Gewicht P_0.

3) Das Dilatometer wird gefüllt. Dazu wird a) der Glascylinder mit destillirtem, gekochtem Wasser gefüllt, das Gefäss A in aufrechter Stellung eingeführt und durch Niederschieben des Drahtes a untergetaucht.

b) Der Cylinder wird mit dem ⊤-Stück und der Saugpumpe in Verbindung gesetzt und durch abwechselndes Schliessen und Oeffnen der Hähne die Luft aus A gesogen und Wasser hineingetrieben. Unterstützt wird die Füllung durch Erwärmen.

Fig. 87.



4) Ist A vollständig gefüllt, so wird es in ein Wasserbad gesetzt.

5) Hat das Dilatometer vollkommen die Temperatur des Wasserbades angenommen, so wird die Flüssigkeit bis zur Marke mit Fliesspapier abgetupft und die Temperatur abgelesen; sie sei t_1.

6) Das Dilatometer wird abgetrocknet und gewogen; Gewicht P_{w_1}.

7) Das Dilatometer wird längere Zeit in einem Wasserbade auf t_2 (ca. 80°) erhitzt; das Wasser wird bis zur Marke abgetupft, das Dilatometer abgekühlt und gewogen; Gewicht P_{w_2}.

8) Das Dilatometer wird entleert. Man hängt dasselbe (A oben, C unten) an einem dünnen Draht in dem leeren Cylinder R umgekehrt an dem in die Höhe gezogenen Drahte auf und pumpt abwechselnd aus und lässt Luft zu.

Berechnung. In dem Gefässe A sind enthalten Wassermengen bei $t_1{}^0$: $P_1 = P_{w_1} - P_0$, bei $t_2{}^0$: $P_2 = P_{w_2} - P_0$. Die Dichten d_1 und d_2 des Wassers bei den Temperaturen t_1 und t_2 findet man aus der Tabelle 4. Die Volumina sind bei t_1 und t_2: $V_1 = P_1/d_1$ und $V_2 = P_2/d_2$ [1]), der cubische Ausdehnungscoëfficient des Glases ist also:

---

[1]) Mit der siebenstelligen Logarithmentafel zu rechnen.

$$\alpha = \frac{V_2 - V_1}{V_1 (t_2 - t_1)}.$$

Beispiel: $P_0 = 11{,}600$ gr; $P_{w_1} = 30{,}406$ ($t_1 = 15^0$); $P_{w_2} = 29{,}864$ ($t_2 = 85^0$); $P_1 = P_{w_1} - P_0 = 18{,}806$; $P_2 = P_{w_2} - P_0 = 18{,}264$. Die Tabelle 4 giebt: $s_1 = 0{,}99915$, $s_2 = 0{,}96876$. Also ist $V_1 = 18{,}822$, $V_2 = 18{,}853$, $V_2 - V_1 = 0{,}031$, $\alpha = 0{,}031/1317{,}54 = 0{,}000024$.

Uebung 2. Bestimmung des cubischen Ausdehnungscoëfficienten von Benzol. Die Einzelheiten der Uebung sind dieselben wie beim Wasser; man verschliesst das Dilatometer bei allen Wägungen mit einem Stopfen, um die Verdunstung zu verhüten. Man erhitzt bis etwa 60^0.

Die Berechnung geschieht nach der obigen Formel.

Beispiel: $P_1 = P_{b_1} - P_0 = 28{,}360 - 11{,}815 = 16{,}545$ gr ($t_1 = 17{,}5^0$) (mit Stopfen); $P_2 = P_{b_2} - P_0 = 27{,}520 - 11{,}815 = 15{,}705$ gr ($t_2 = 60{,}5^0$); $P_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] = 16{,}562$ gr; $P_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] - P_2 = 0{,}857$; $\beta = 0{,}00127$. (Der Index b bezieht sich auf Benzol.)

Allgemeines. Die Volumina der Gewichtseinheit bei irgend einer Temperatur t stellt man als Function der Temperatur durch eine Formel dar von der Form:

$$V_t = V_o (1 + at + bt^2 + ct^3),$$

wo a, b, c Constanten sind, die sich aus Bestimmungen bei wenigstens drei Temperaturen ergeben.

II. Thermometer.

Gebraucht wird: Gefäss für Nullpunktsbestimmungen, Eis mit Reibeisen bezw. Schnee, Flanellstreifen. Siedegefäss mit Wassermanometer, Dreifuss und Brenner für dasselbe, Barometer. Spiegelglasstreifen oder Lupe auf Stativ zum Calibriren; verschiedene Thermometer mit grösseren Fehlern; ein feines Thermometer.

Normalthermometer. Topf mit Dreifuss, Brenner und Rührer und einem Stativ mit zwei Klammern zum Vergleiche zweier Thermometer.

Einleitung. Das Thermometer misst die Temperatur der Körper, in deren Inneres es hinreichend lange eingesenkt worden ist, durch die Volumina einer in ihm enthaltenen Flüssigkeit, etwa Quecksilber oder Alkohol (über das Luftthermometer s. S. 80). Die beiden Fundamentalpunkte sind der 0-Punkt (Temperatur des schmelzenden reinen Schnees oder Eises) und der 100-Punkt (Temperatur des siedenden Wassers bei 760 mm Druck); das Volumen einer cylindrischen, die Flüssigkeit enthaltenden Röhre zwischen diesen Punkten wird in 100 Theile getheilt und danach werden die Grade bestimmt. Erwärmt man das Thermometer, so steigt die Flüssigkeit in der Röhre in die Höhe und die Temperatur wird an dem Stande derselben in der Röhre gemessen.

Will man mit irgend einem Thermometer Messungen ausführen, so muss man sich davon überzeugen, ob 1. die Fundamentalpunkte wirklich an den Stellen 0 bis 100 der Theilung liegen, und 2. ob die angegebenen Grade gleichen Volumen in der Röhre entsprechen. Zeigen sich Abweichungen, so sind alle mit dem Instrumente gemessenen Temperaturen entsprechend zu corrigiren.

1. Bestimmung des Nullpunktes.

Uebung. 1) Man senkt das Thermometer, dessen Kugel man mit etwas Flanell umwickelt hat, in ein Gefäss A von der Form Fig. 88, füllt dieses mit reinem Schnee oder fein gepulvertem Eis und giesst etwas Wasser darauf. Das Eis darf das Thermometer nicht direct berühren, da seine Temperatur oft unter 0^0 liegt, während die des Schmelzwassers, das mit ihm in Berührung ist, genau 0^0 beträgt. Die Oeffnung o dient zum Abfliessen des Schmelzwassers. 2) Nach einiger Zeit liest man die Stellung der Quecksilbersäule t_0, den wahren Nullpunkt, ab.

Von allen Ablesungen ist $t_0{}^0$ abzuziehen, wobei auf das Vorzeichen von t_0 zu achten ist.

Bemerkung. Meist liegt der wahre Nullpunkt höher, als auf der Scala angegeben, da mit der Zeit das Volumen der Kugel sich verkleinert, also die Thermometerflüssigkeit in die Höhe gedrückt wird. Ebenso treten grössere und kleinere Verschiebungen des Nullpunktes nach jeder Erwärmung ein. Von diesen oft sehr störenden „thermischen Nachwirkungen" ist das durch einen rothen eingeschmolzenen Glasfaden gekennzeichnete „Jenenser Normalglas" frei. Mit dem Druck nimmt die Temperatur des schmelzenden Eises ab, doch so wenig (für 1 Atm. um ca. $0{,}00828^0$), dass wir dies bei unseren Messungen vernachlässigen können.

Fig. 88.

2. Bestimmung des Siedepunktes.

Apparat Fig. 89. Derselbe besteht aus einem Blechgefäss A mit dem Blechrohr B. Letzteres ist von einem Mantel C umgeben, welcher bei r und r' und entsprechend vorn und hinten seitliche Röhren trägt, in deren eine, r', ein kleines Wassermanometer eingesetzt ist.

Uebung. 1) Man befestigt in dem Deckel des Gefässes mittelst eines Korkes das Thermometer, so dass der dem Siedepunkt entsprechende Theilstrich nur wenig über denselben hervorragt.

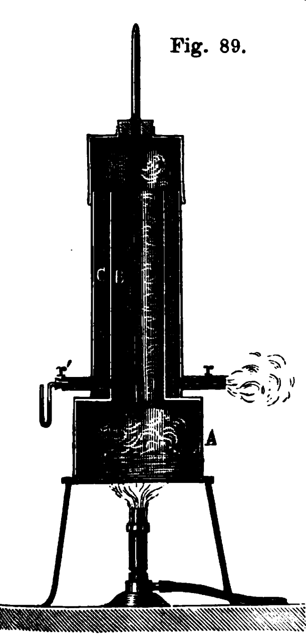


Fig. 89.

2) Man giesst so viel Wasser in A, dass die Kugel des Thermometers nicht in dasselbe eintaucht, und erhitzt. Der Dampf umspült das Thermometer, geht zwischen B und C nach unten, strömt bei r aus und schützt den inneren Theil des Apparates B vor Abkühlung durch Strahlung.

3) Man liest, wenn der Dampf etwa fünf Minuten aus r ausgeströmt ist, ab: den Stand T^0 des Thermometers, die Höhe p der Wassersäule in dem Manometer bei r', den Barometerstand b.

Man reducirt b auf 0^0 nach S. 27, addirt $p/13{,}6$ zu b (S. 84) und entnimmt der Tabelle 12 den Siedepunkt $T_1{}^0$ des Wassers bei $b + p/13{,}6$ mm Druck.

3. Correction der zwischenliegenden Grade.

Hat ein Thermometer den wahren Nullpunkt bei dem Scalentheile t_0 und den Siedepunkt $T_1{}^0$ bei dem Scalentheil T^0, ist die Thermometerröhre cylindrisch und sind die Scalentheile überall gleich gross, so entspricht einem Scalentheile eine Temperaturdifferenz von $T_1/(T - t_0) = c$ Grad. Zeigt das Thermometer eine Temperatur τ' an, so ist die wahre Temperatur τ:

$$\tau = (\tau' - t_0) \cdot c,$$

einer wahren Temperatur τ entspricht eine solche τ' am Thermometer:

$$\tau' = t_0 + \tau/c.$$

Der wahren Temperatur 100^0 entspricht am Thermometer:

$$T' = t_0 + 100 \cdot c.$$

Beispiel: Thermometer: $T = 101{,}6^0$ bei $b = 749{,}1$ und $p/13{,}6 = 2{,}7$ mm. Für den Druck 751,8 mm ist der Siedepunkt: $T_1 = 99{,}7^0$; der wahre Nullpunkt lag bei $t^0 = + 2{,}7$, also ist $c = 0{,}99$; also ist $c = 98{,}9/99{,}7 = 0{,}992$. Bei der Temperatur 100^0 zeigt das Thermometer also $T' = 2{,}7 + 100 \times 0{,}992 = 101{,}9^0$ an.

4. Calibriren einer Thermometerröhre.

Uebung. 1) Man neigt das Thermometer, so dass die Kugel nach oben gerichtet ist, und stösst das untere Ende vorsichtig gegen die Hand, bis ein Stück des Quecksilberfadens abreisst. Wenn sich trotz mehrfacher Versuche zu lange Fäden abtrennen, so steckt man die Kugel in Eis und führt den Stoss aus, wenn der Faden im Rohr die gewünschte Länge hat (gewöhnlich reisst der Faden dort ab, wo er aus der Kugel austritt).

Die Länge des Fadens soll im Fundamentalabstande und in dem Intervall, in dem man calibriren will, ohne Rest etwa n mal theilbar sein; bei dem Intervall 0 und 350 wählt man z. B. $a = 50$ Scalentheilen, hier ist $n = 7$.

2) Man bringt den losgetrennten Faden nahe an das eine Ende der Thermometerröhre.

3) a) Man legt unter das Thermometer einen Spiegelglasstreifen und bestimmt, mit welchen Gradstrichen die Enden des Fadens zusammenfallen. Man bringt das Auge so über die Enden des Fadens, dass das Spiegelbild des Auges mit den Enden zusammenzufallen scheint.

Oder b) man legt das Thermometer auf ein Brett, über dem eine Lupe befestigt ist. Unter der Mitte derselben ist ein Strich gezogen, über dem zur Vermeidung von Parallaxenfehlern (s. diese S. 56) das Ende des Fadens beim Ablesen liegen muss.

4) Durch mässiges Neigen und Klopfen des Thermometers verschiebt man den abgerissenen Faden so in dem Rohr, dass stets sein Anfang möglichst mit seinem früheren Ende zusammenfällt, und bestimmt jedesmal die Länge des Fadens in Scalentheilen.

5) Man berechnet die Abweichungen δ der Fadenlänge von derjenigen von a (50) Scalentheilen.

Es sei die Fadenlänge auf der Strecke:

0 bis a	(0 bis 50)	$a + \delta_1$
a „ $2a$	(50 „ 100)	$a + \delta_2$
. . . . .	. . . . .	. . . .
$(n-1)\,a$ „ na	(300 „ 350)	$a + \delta_n$,

wo die δ positiv oder negativ sein können. Ist dann t_0 die Lage des Nullpunktes, $T = 100 + t_1$ die des Hundertpunktes, also $t_1 = T - 100$ die Abweichung vom wahren Siedepunkt, und setzt man $(t_0 - t_1 + \delta_1 + \delta_2 +)/n = \alpha$ [die Summe nur zwischen 0 und 100 genommen oder z. B. bei $a = 50$ $\alpha = (t_0 - t_1 + \delta_1 + \delta_2 + \cdots)/n$], so ist die Correctionstabelle:

Correction:	Theilstrich:
0 (0 = 0 . 50)	$-\,p_0$
$1a$ (50 = 1 . 50)	$\alpha - (p_0 + \delta_1)$
$2a$ (100 = 2 . 50)	$2\alpha - (p_0 + \delta_1 + \delta_2)$
. . . .	. . . .
na (350 = 7 . 50)	$n\alpha - (p_0 + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \cdots + \delta_n)$.

5. Vergleichung zweier Thermometer.

Uebung 1. Man stellt beide Thermometer dicht neben einander, am besten so zusammengebunden, dass ihre Kugeln in gleicher Höhe liegen, in einen mit Wasser resp. Oel oder dergleichen gefüllten Topf, erwärmt langsam, rührt fortwährend um, so dass beide immer die gleiche Temperatur haben, und liest an beiden die Temperatur ab. Ist das erste Thermometer ein sogenanntes „Normalthermometer“, so kann man die gefundenen Differenzen beider Instrumente bei verschiedenen Temperaturen dazu benutzen, um eine Correctionstabelle für das zweite zu entwerfen. Fieberthermometer dürfen, wie alle sogenannten Maximalthermometer, nur bei aufsteigender, Minimalthermometer nur bei absteigender Temperatur verglichen werden. Gewöhnliche Thermometer werden auch bei allmählicher Abkühlung des Wasser- oder Oelbades verglichen.

Uebung 2. Man controlirt die nach 4. entworfene Tabelle durch Vergleich mit dem Normalthermometer.

Bemerkung: Bei jeder Temperaturmessung wird vorausgesetzt, dass das Thermometer stets bis zum Niveau des Quecksilbers in der Röhre in dem Raume sich befindet, dessen Temperatur gemessen wird. Ist dies nicht der Fall, so hat der herausragende Faden nicht die Temperatur des Raumes, und das Thermometer zeigt eine niedrigere Temperatur an, als derselbe wirklich besitzt. Um aus der beobachteten Temperatur die wahre zu finden, hängt man neben das Thermometer

ein zweites, dessen Kugel etwa in der Mitte des herausragenden Fadens sich befindet und die mittlere Temperatur desselben angiebt. Ist T die an dem Thermometer abgelesene Temperatur, t die mittlere Fadentemperatur, so ist zu T noch die Correction $k(T - t)l$ hinzuzufügen, wo l die Länge der herausragenden Fäden in Graden und $k = 0{,}000156$ der scheinbare cubische Ausdehnungscoëfficient des Quecksilbers im Glase ist. — Genaue Vergleichungen von Thermometern werden von der Technischen Reichsanstalt in Charlottenburg gegen Vergütung ausgeführt.

III. Schmelzpunkt.

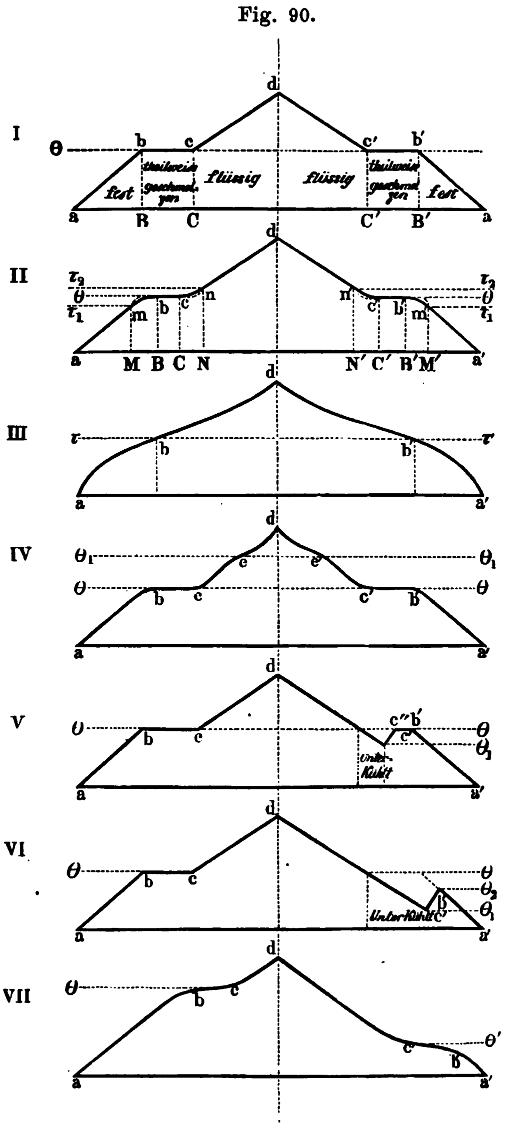
Gebraucht wird: Schmelzröhrchen; Thermometer: Paraffinbad; Dreifuss; Asbestpappe; Schmelzgefässe mit Pb_4Sn, Pb_2Sn und Zinn; Thermometer (bis ca. 360°); Oel; Stativ mit Ring; Brenner; Blechgefäss mit Pappdeckel; Chronoskop.

Einleitung. Um die Vorgänge bei dem Schmelzen eines Körpers zu verfolgen, nehmen wir an, dass demselben in gleichen Zeiten gleiche Wärmemengen zugeführt werden, etwa dadurch, dass man ihn in einer Schale durch eine constant brennende Flamme erwärmt. Wir lesen in gleichen Zeitintervallen die Temperatur ab und tragen die Zeiten als Abscissen und die zugehörigen Temperaturen als Ordinaten auf; die Curven Fig. 90 (a. f. S.) sind in dieser Weise gezeichnet.

In dem einfachsten Falle (I) (Fig. 90) geht die ganze Menge des festen Körpers bei einer bestimmten Schmelztemperatur $\Theta = bB$ aus dem festen in den flüssigen Zustand über. Zunächst tritt bei gleicher Wärmezufuhr zu dem festen Körper auch eine gleiche Temperaturerhöhung desselben ein, die Curve ist eine gerade ansteigende Linie ab; bei der Schmelztemperatur Θ beginnt das Schmelzen; dabei wird Wärme verbraucht, und die Temperatur bleibt, bis Alles geschmolzen ist, constant: die Curve ist eine der Abscissenaxe parallele Linie. Ist der ganze Körper geschmolzen, so bewirkt eine neue Wärmezufuhr auch ein erneutes Steigen der Temperatur desselben. Bei dem zweiten Falle (II) beginnt der Körper bei einer Temperatur τ_1 weich zu werden, bei der Temperatur Θ tritt das Schmelzen des grössten Theiles ein, setzt sich aber noch ein wenig oberhalb derselben bis zu τ_2 fort; je kleiner $\tau_2 - \tau_1$ ist, um so mehr nähert sich der Fall II dem Falle I. Zwischen τ_1 und τ_2 steigt das Thermometer langsam und bleibt bei Θ eine Zeit lang stehen, da das Weichwerden und Schmelzen mit einem Wärmeverbrauch verbunden ist. Im Falle III findet das Erweichen ganz allmählich statt, die Temperaturzunahme ist während einer längeren Zeit verlangsamt, doch bleibt die Temperatur nicht längere Zeit constant. Im Falle IV tritt bei einer Temperatur Θ ein constanter Schmelzpunkt, bei dem ein grösserer Theil der Substanz flüssig wird, bei einer zweiten Θ_1 ein langsames Ansteigen, herrührend von dem Uebergang des Restes an fester Substanz in den flüssigen Zustand, auf.

Die beim Abkühlen auftretenden Processe sind gewöhnlich genau dieselben wie beim Erwärmen, erfolgen nur im entgegengesetzten Sinne; sie werden durch die rechten Hälften der Figuren dargestellt. Die Schmelzpunkte werden jetzt Erstarrungspunkte. Es können aber Complicationen in Folge des Ueberschmelzens oder Unterkühlens eintreten (Fall V und VI). Dann erstarrt der Körper nicht bei derjenigen Temperatur Θ, bei der er schmilzt, sondern bei einer niedrigeren Θ_1; die beim Erwärmen frei werdende Wärmemenge erhitzt ihn dann, wenn Θ_1 nicht gar zu niedrig ist, bis zu Θ, sonst nur bis zu einer niedrigeren Temperatur Θ_2.

Fig. 90.



Eine vollkommene Unregelmässigkeit tritt ein, wenn ein Körper sich bei seinem Erhitzen über den Schmelzpunkt Θ in eine andere Modification mit höherem oder niedrigerem Schmelzpunkt Θ' verwandelt (Fall VII).

Bestimmung des Schmelzpunktes.

Methode I. Man beobachtet den Schmelzpunkt, die Temperatur des Ueberganges aus dem festen in den flüssigen Zustand direct.

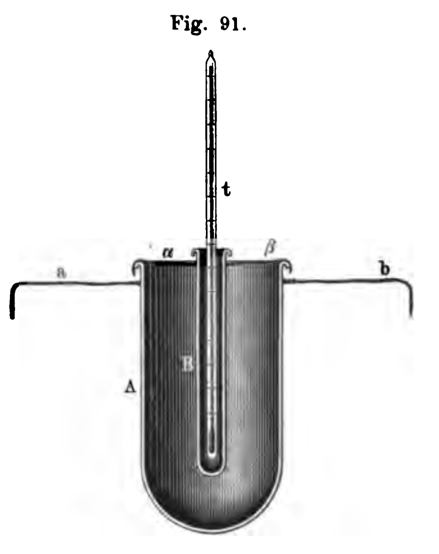
Uebung. 1) Man saugt die Substanz im geschmolzenen Zustande in ein dünnwandiges Capillarröhrchen ein, das man dann unten abschmilzt, oder wirft in ein unten zugeschmolzenes dünnwandiges

Röhrchen die gepulverte Substanz. Besser biegt man das Capillarröhrchen U-förmig um und bringt die Substanz in die Biegung.

2) Man befestigt durch ein übergeschobenes Stückchen Kautschukschlauch die Röhrchen an einem Thermometer so, dass sich die Substanz neben der Thermometerkugel befindet.

3) Man taucht das Ganze in ein Becherglas, welches mit Wasser, Oel, Paraffin oder Schwefelsäure gefüllt ist, und das man auf ein Stativ auf Asbestpappe stellt. Man erwärmt und bestimmt unter fortwährendem Umrühren die Temperatur beim Schmelzen und Erstarren der Substanz; der Uebergang aus dem festen in den flüssigen Zustand ist meist an einer Veränderung des Aussehens der Glaswand erkennbar.

Fig. 91.



Methode II. Man beobachtet die Temperatur (Θ der Curve), bei welcher der Stand des Thermometers sich beim Abkühlen eine Zeit lang nicht ändert.

Apparat. In einem weiten cylindrischen Gefäss A, Fig. 91, am besten aus Metall, wird die zu untersuchende Substanz geschmolzen; das Gefäss A wird von zwei Drähten a und b getragen. In der Axe von A ist durch Drähte α und β ein engeres, unten geschlossenes und mit einer hochsiedenden Flüssigkeit, z. B. Oel, gefülltes Rohr B eingehängt, resp. an das äussere Gefäss angebunden; in B ist das Thermometer t eingesenkt. Das innere Rohr ist so weit, dass es gerade das Thermometer aufnimmt, dessen Kugel es vor dem Zerdrücken beim Erstarren der geschmolzenen Substanz schützt. Nach dem Schmelzen hängt man das Gefäss A mittelst a und b in ein grösseres Metallgefäss, das man eventuell in ein Gefäss mit Wasser einsetzt.

Uebung 1. 1) Man bringt in das Gefäss Zinn.

2) Man erhitzt bis auf ca. 260°.

3) Man lässt abkühlen und bestimmt zu den Zeiten z von $^1/_2$ Minute zu $^1/_2$ Minute resp. Minute zu Minute die Temperatur t und bildet die Differenzen Δ zwischen je zwei nach einander beobachteten Temperaturen. Die Temperatur bleibt bei ca. 230° längere Zeit constant.

Uebung 2. Man bringt in ein entsprechendes Gefäss eine Legirung Pb_4Sn (7 Thle. Pb und 1 Thl. Sn), erhitzt auf etwa 320° und verfährt wie eben.

Beispiel:

z =	0′	1′	2′	3′	4′	5′	6′	7′	8′	9′	10′	11′
t =	314,0	301,0	290,0	282,0	275,5	269,0	261,0	252,2	242,0	231,5	221,0	210,0
$\varDelta$ =		13,0	11,0	8,0	6,5	6,5	8,0	8,8	10,2	10,5	10,5	11,0
												10,0

z =	12′	13′	14′	14½′	15′	15½′	16′	16½′	17′	18′	19′
t =	200,0	190,0	181,5	178,2	177,9	175,0	171,5	167,0	163,0	156,0	148,5
$\varDelta$ =		10,0	8,5	(3,3)	(0,3)	(2,9)	(3,5)	(4,5)	(4,0)	7,0	7,5

Die Temperatur fällt zuerst von 314 bis 282° schnell, dann bis 269° langsam, dann wieder schneller, bis bei 178° ein fast vollkommener Stillstand eintritt, dann folgt ein schnelleres Fallen. Die Temperatur von ca. 282 bis 269° entspricht der Stelle Θ_1, Fig. 90 IV, die Temperatur 178° der Stelle Θ.

Uebung 3. Mit einem Gemisch Pb_2Sn wird derselbe Versuch angestellt. Der Stillstand ist bei 178° weit ausgesprochener.

Allgemeines.

Legirungen und Gemische von Salzen, von Fetten etc. haben Schmelzpunkte, die niedriger liegen, als diejenigen der Componenten, Pb schmilzt bei 322°, Sn bei 230°, Pb_2Sn bei 178° u. s. w. Schon kleine Zusätze eines Metalles zu einem anderen erniedrigen den Schmelzpunkt desselben; man hat es mit ganz analogen Erscheinungen wie bei den Gefrierpunktserniedrigungen zu thun (S. 164). Die bei Pb_4Sn beobachteten zwei Schmelzpunkte und die analogen Erscheinungen bei Gemischen von Fetten, Salzen etc. (so bei $NaNO_3$ und KNO_3) lassen sich im Wesentlichen folgendermaassen erklären. Kühlt sich ein solches Gemisch von einer so hohen Temperatur ab, dass bei ihr die gesammte Substanz flüssig ist, so geht die Abkühlung durch Strahlung schnell vor sich; ist die Temperatur so weit gesunken, dass eine Ausscheidung der einen der beiden Substanzen, die man als gelöst in der anderen B ansehen kann, erfolgt, so wird durch die dabei frei werdende Wärme die Abkühlung verzögert, und zwar um so mehr, je grösser die innerhalb eines gleichen Temperaturintervalles sich abscheidenden Mengen sind; diese nehmen aber mit abnehmender Temperatur ab, die Abkühlung wird also erst stark, dann langsam verzögert. Bei weiterer Abkühlung wird eine Temperatur Θ erreicht, bei der auch die Substanz B, die man als in A gelöst betrachten kann, sich auszuscheiden beginnt. Bei dieser Temperatur befinden sich A und B im Zustande gegenseitiger Sättigung und scheiden sich gleichzeitig so aus, dass dieser Zustand beständig bewahrt bleibt. Der sogenannte zweite Schmelzpunkt Θ_1 der Legirungen ist also kein wirklicher Schmelzpunkt, sondern entspricht dem Beginn der Ausscheidung des einen Metalles.

IV. Dampfdrucke und Siedepunkte.

1. Unterschied zwischen Dampf und Gas.

Gebraucht wird: **Quecksilberkasten; Stativ mit verschiebbarem Zeiger z; Unterlegkork; Quecksilberröhre mit Napf; Quecksilber; Barometerröhre mit Scala; kleiner Trichter; Stativ mit einer Gabel und zwei Klemmen; Thermometer; Aether; unten umgebogene Pipette; Fliesspapier.**

Einleitung. Dampf ist ein Gas nahe am Condensationspunkte, es verflüssigt sich schon bei mässigen Druckerhöhungen bezw. Temperaturerniedrigungen. Spannkraft eines Dampfes oder besser Dampfdruck ist der Druck, den der Dampf auf die Wände des ihn einschliessenden Gefässes ausübt (er wird gemessen durch die Depression einer Quecksilbersäule, wenn sich der Dampf in der Torricelli'schen Leere über derselben befindet).

Uebung. 1) Man füllt ein etwa $2^1/_2$ cm weites, 80 cm langes, unten geschlossenes Rohr, welches sich oben erweitert, mit Quecksilber. Das Rohr wird in verticaler Lage befestigt. Die Erweiterung (E) dient als Quecksilberwanne; über derselben ist ein Zeiger in verticaler Richtung beweglich.

2) Man füllt ein Barometerrohr mit Theilung mit Quecksilber, entfernt die an den Wänden adhärirenden kleinen Luftblasen dadurch, dass man sie in das Torricelli'sche Vacuum treibt (S. 96).

3) Man kehrt das Rohr in der Erweiterung E unter Quecksilber um und liest den Stand des so erhaltenen Barometers b ab.

4) Man lässt eine Luftblase in das Rohr treten, klemmt es im Stativ ein und liest den Stand wieder ab; er sei b'.

5) Man stellt den verschiebbaren Zeiger Z auf die Kuppe der Quecksilbersäule bei einer bestimmten Stellung des Barometerrohres ein und hebt und senkt dasselbe; das Niveau steigt und fällt. Bei Vergrösserung des Raumes über dem Quecksilber, welcher von der Luft erfüllt ist, wird der Druck der abgeschlossenen Luft (gemessen durch die Depression $\Delta = b - b'$) geringer, bei Verkleinerung wächst er, und zwar nach dem Boyle-(Mariotte)'schen Gesetz (s. o. S. 78).

6) Man misst das Volumen V über der Quecksilberkuppe und den Druck Δ (Barometerstand weniger jeweilige Höhe der Quecksilbersäule).

Beispiel:

$V = 28$ 24 20 16 12 8 4 $\Delta = 2$ $2^1/_2$ 3 4 5 8 16 cm

$V\Delta = 56$ 60 60 64 60 64 64

also nahezu: $V \times \Delta = Const.$

Dadurch ist das Boyle-Mariotte'sche Gesetz angenähert bestätigt.

7) Man füllt das Barometer aufs Neue und bringt mittelst einer unten umgebogenen Pipette in das zunächst schräg gestellte Rohr etwas Aether, indem man in die obere Oeffnung der Pipette hineinbläst, ohne Luftblasen mitzureissen, dann stellt man das Rohr vertical.

8) Man misst die Quecksilberhöhe b'', die Depression ist dann $\delta = b - b''$. Ueber der Quecksilberkuppe befindet sich eine kleine Flüssigkeitssäule, deren Gewicht zu vernachlässigen ist. Die Depression rührt also allein von dem Drucke des Dampfes her: der Druck des Aetherdampfes bei der Zimmertemperatur ist $\delta = b - b''$ mm.

9) Man stellt den Zeiger auf die Kuppe der Quecksilbersäule bei einer bestimmten Stellung des Barometerrohres ein und hebt und senkt das Rohr in verticaler Richtung; das Niveau bleibt sehr nahe (wenn man die Volumenvergrösserung nicht zu weit treibt) constant, so lange noch flüssiger Aether im Rohre vorhanden ist: Es entwickeln sich immer neue Dämpfe. Bei der Volumenverminderung verdichtet sich wieder eine entsprechende Menge Dampf zu Flüssigkeit.

Der Aetherdampf befindet sich im Maximum seines Dampfdruckes (seiner Spannkraft), das Maximum ist unabhängig von der Menge der vorhandenen Flüssigkeit; die gefundene Depression misst den maximalen Dampfdruck (die maximale Spannkraft).

10) Man erwärmt den Aether durch Anlegen der Hand. Der Dampfdruck steigt sehr bedeutend.

Beispiel: $b = 730$; $b'' = 370$. $\delta = 360$ bei $t = 15^0$.

Allgemeines.

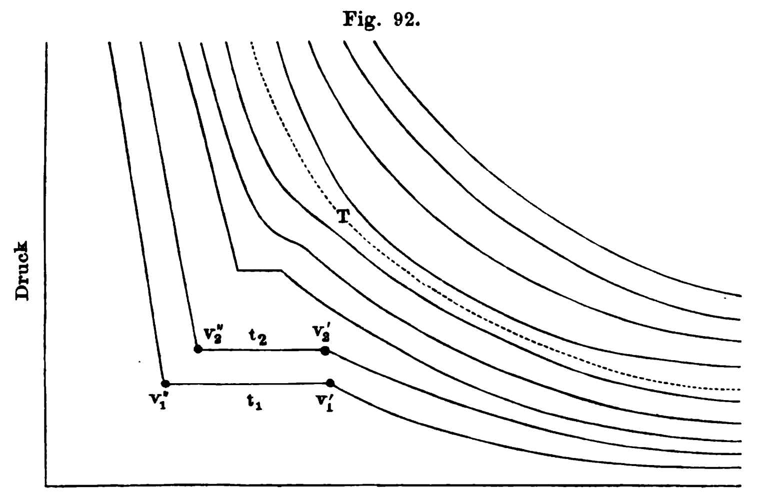
Dämpfe, welche das von der Temperatur abhängige Maximum des Dampfdruckes erreicht haben, nennt man gesättigte Dämpfe, da bei jeder noch so kleinen Temperaturerniedrigung oder Druckerhöhung eine Verdichtung eines Theiles derselben eintritt.

Ist bei Vergrösserung des von dem Dampf erfüllten Raumes derselbe so gross geworden, dass alle Flüssigkeit verdampft ist, so folgen die Dämpfe bei weiterer Volumenvermehrung sehr nahe dem Gesetz von Boyle-Mariotte. Man nennt die Dämpfe dann überhitzte Dämpfe.

Die Beziehungen zwischen Druck und Volumen eines Gases, Dampfes und einer Flüssigkeit veranschaulicht die graphische Darstellung (Fig. 92), bei der als Abscissen die Volumina, als Ordinaten die Drucke gewählt sind. Verringert man bei einer constanten, nicht zu hohen Temperatur t_1 das Volumen, ausgehend von einem grossen, nur von Dampf erfüllten Volumen, so nimmt zunächst für kleine Volumenänderungen der Druck langsam zu. Bei einem bestimmten Volumen

v_1' und einem bestimmten Druck beginnt der Dampf sich zu condensiren. Bis aller Dampf in den flüssigen Zustand übergegangen ist, ändert sich der Druck nicht; dann, im flüssigen Zustande, entsprechen kleinen Volumenänderungen grosse Druckänderungen. Je höher die Temperatur ist, um so höher ist der Druck, bei dem die Condensation beginnt, um so kleiner ist das Volumen des Dampfes in dem Momente, in dem eine Condensation beginnt, um so grösser ist das Volumen der Flüssigkeit in dem Momente, in dem aller Dampf condensirt ist, um so kleiner sind also die Unterschiede $(v_1' - v_1'')$, $(v_2' - v_2'')$ u. s. w. der Volumina

Fig. 92.



$(v_1'$ und $v_2')$ des Dampfes unmittelbar vor dem Beginn der Condensation und der Flüssigkeit $(v_1''$ und $v_2'')$ unmittelbar nach Vollendung derselben; ein Unterschied, durch den der Dampfzustand von dem Flüssigkeitszustande unterschieden ist. Bei einer bestimmten Temperatur T, der sogenannten **kritischen Temperatur**, wird dieser Unterschied gleich Null, der Dampf geht continuirlich in die Flüssigkeit über, beide sind nicht von einander zu unterscheiden. Das Volumen, bei dem bei einer um unendlich wenig niedrigeren Temperatur die Condensation eintritt, heisst das **kritische Volumen**, und der entsprechende Druck, bei dem dies stattfindet, der **kritische Druck**.

Curven, welche die Beziehung zwischen Druck und Volumen bei constanter Temperatur darstellen, wie die in Fig. 92 gezeichneten, heissen **Isothermen**.

2. Bestimmung der Dampfdrucke.

Gebraucht wird: Barometerröhre mit Glasmantel; Quecksilber; Thermometer; unten umgebogene Pipette; Aether; Kathetometer; Barometer; Topf mit warmem Wasser.

Princip. Man bringt in das Torricelli'sche Vacuum einer Barometerröhre A die Flüssigkeit, deren Dampfdruck bestimmt werden soll, erhitzt dieselbe sammt der in dem Rohre enthaltenen Quecksilbersäule auf t^0 und bestimmt die Höhe h der Quecksilbersäule. Dann ist der Dampfdruck δ gleich dem auf 0^0 reducirten Barometerstand b, vermindert um die auf 0^0 reducirte Quecksilbersäule h; ist $H = h \,.\, d/d_0$ (d_0 resp. d die Dichten des Quecksilbers für 0^0 resp. t^0) die reducirte Säule, so ist:

$$\delta = b - H.$$

Apparat: Ein mit Quecksilber gefülltes Barometerrohr A wird in einer Quecksilberwanne umgekehrt, über dasselbe ein cylindrisches Glasrohr B als Mantel geschoben, das an seinem unteren Ende durch einen doppelt durchbohrten Kork verschlossen ist. Durch die eine Durchbohrung geht das Rohr A, durch die andere ein U-förmig umgebogenes Glasrohr α, dessen einer Schenkel bündig mit dem Kork abschneidet, dessen anderes Ende höher liegt, als das obere Ende des Rohres B; an dem letzteren trägt es einen Trichter c. Das obere Ende von B ist ebenfalls mit einem doppelt durchbohrten Kork versehen; durch die eine Durchbohrung geht ein aussen nach unten umgebogenes Glasrohr β, durch die andere ein Glasrohr, das als Führung für einen Rührer dient. Giesst man durch den Trichter c Wasser, so füllt sich das Rohr B, der Ueberschuss fliesst durch β ab. Das Mantelrohr ist mit Wasser gefüllt, in dem ein Thermometer hängt. Neben dem Apparate wird die S. 95 beschriebene Vorrichtung zur Messung der Quecksilbersäulen aufgehängt, oder in passender Entfernung ein Kathetometer aufgestellt.

Uebung. 1) Man füllt das Rohr B mit kaltem Wasser und liest die Höhe der Quecksilbersäule h in A und die Temperatur des Wassers im Mantel B ab.

2) Man bringt wie bei 7) auf S. 152 etwas Aether in das Vacuum und liest nach längerem Rühren die Höhe h_1 der Quecksilbersäule und die Temperatur des Wassers t_1 ab.

3) Man giesst durch das Rohr α so viel warmes Wasser ein, dass das Thermometer um etwa 5^0 steigt, und bestimmt die Höhe der Quecksilbersäule h_2 und die Temperatur t_2.

4) Man verfährt wie bei 3), indem man die Temperatur um etwa 5^0 steigen lässt.

5) Man reducirt h, h_1 und h_2 auf 0^0.

6) Man berechnet die Dampfdrucke $\delta_1 = h_1 - h$, $\delta_2 = h_2 - h$ etc. und stellt a) die zusammengehörigen Temperaturen und Dampfdrucke in einer Tabelle zusammen; b) zeichnet eine Curve mit den Temperaturen als Abscissen, den Dampfdrucken δ als Ordinaten. Sie zeigt, dass mit steigender Temperatur die Dampfdrucke sehr viel schneller als die Temperaturen wachsen. Zum Vergleiche der erhaltenen Zahlen dient die folgende Tabelle.

Beispiel: Dampfdrucke δ des gesättigten Aetherdampfes:

t	δ	t	δ
0^0	184 mm	20^0	433 mm
5^0	231 „	25^0	526 „
10^0	287 „	30^0	635 „
15^0	354 „	35^0	761 „

3. Bestimmung des Siedepunktes.

Gebraucht wird: Fractionirkolben (Fig. 93) mit Thermometer und Vorlage, Stativ mit Brenner; Aethyl-, Amylalkohol.

Princip. Sobald der Dampfdruck einer Flüssigkeit, die sich in einem von unten erwärmten Gefässe befindet, durch Erwärmung so gross geworden ist, dass er den äusseren Druck, plus dem Druck der auf dem Boden des Erhitzungsgefässes lastenden Flüssigkeitssäule (welch letzterer indessen relativ klein ist) zu überwinden vermag, so tritt an dem Boden eine Dampfentwickelung, ein Sieden ein. Die Temperatur, bei der dies stattfindet, heisst der Siedepunkt; er ist gleich der Temperatur, welche die Flüssigkeit hat, die sich aus den Dämpfen durch Condensation bildet. Befindet sich eine Flüssigkeit in einem sorgfältig gereinigten Gefässe, und ist sie durch vorheriges Auskochen luftfrei gemacht, so lässt sie sich über ihren Siedepunkt, ohne dass sie siedet, erhitzen, sie lässt sich überhitzen; ein in dieselbe eingetauchtes Thermometer zeigt also eine höhere Temperatur, als den normalen Siedepunkt an; dagegen ist die Temperatur der sich condensirenden Dämpfe genau gleich dem Siedepunkt.

Fig. 93.



Die Siedepunkte sind vom Druck abhängig. Die Siedepunkte des Wassers für verschiedene Drucke giebt die Tabelle 12.

Apparat. Zur Bestimmung des Siedepunktes bei dem herrschenden Barometerstande dient der Apparat Fig. 93. An den Hals B eines kleinen Kolbens A, in den das Thermometer eingesetzt ist, ist ein seitliches Rohr C schräg nach unten angesetzt. Ueber C schiebt man zum Auffangen der aus den Dämpfen sich condensirenden Flüssigkeit einen Kolben, und zwar bei hochsiedenden Flüssigkeiten direct, bei niedrigsiedenden unter Zwischenschaltung eines Kühlers.

Uebung. 1) Man bringt die Flüssigkeit in den Kolben und wirft ein paar Platinschnitzel oder gut gereinigte Tarirgranaten oder Glasperlen hinein, um das Sieden regelmässiger zu machen.

2) Man erhitzt, bis das Thermometer in den Dämpfen eine constante Temperatur T zeigt.

3) Man liest den Barometerstand ab. Dann ist T der Siedepunkt beim Barometerstande b.

Die Uebung wird ausgeführt für Wasser, Aethyl- und Amylalkohol.

Allgemeines.

1. Schmelzpunkt und Siedepunkt sind für reine Substanzen besonders charakteristische Grössen.

2. Die Schmelzpunkte und Siedepunkte der Elemente stehen in naher Beziehung zu deren Stellung im periodischen System (S. 73). Die auf ansteigenden Theilen der Curve liegenden Elemente sind leichtflüssig und flüchtig, die auf absteigenden Theilen gelegenen strengflüssig und schwerflüchtig.

3. Die Siedepunkte SP. des Aethyl- und Amylalkohols ergeben sich bei $b = 760$ mm für C_2H_6O : SP. = 78,5, $C_5H_{10}O$: SP. = 130. Bei einem Ersatz von H durch CH_3 wächst bei primären Alkoholen der Siedepunkt um etwa 19^0. Derselbe Satz gilt sehr angenähert für die Fettsäuren. Doch ist er nicht allgemein gültig, ja in einzelnen Fällen ruft sogar der Eintritt von CH_3 statt H eine Siedepunktserniedrigung hervor, so bei $C_2H_4(OH)_2$: SP. = 197, $C_2H_3(CH_3)(OH)_2$: SP. = 188, $C_2H_2(CH_3)_2(OH)_2$: SP. = 183.

Für die verschiedenen Gruppen organischer Verbindungen und für die verschiedenen Arten der Substitution ist eine grosse Anzahl von Regelmässigkeiten gefunden worden, welche sich aber noch nicht zu einheitlichen Gesetzen zusammenfassen lassen.

V. Hygrometrie.

Gebraucht wird: Aspirator, oben und unten mit Hahn versehen, von circa 15 Liter Inhalt; zwei Chlorcalciumröhren von 1 bis 2 cm Weite und circa 20 cm Länge; Verbindungsschläuche; feine Waage mit Gewichtssatz; Daniell's Hygrometer mit Aether; Döbereiner-Regnault's Hygrometer mit Schlauchverbindungen zum Aspirator (event. einem zweiten Aspirator); August's (Differential-) Psychrometer; Saussure's Haarhygrometer mit Stativ; Glasfenster von 40 × 60 cm in einem Holzrahmen mit Füssen; Abflussgefässe für die Aspiratoren.

Einleitung.

Den Grad der Luftfeuchtigkeit bei einer Temperatur t misst: 1. Die wahre Feuchtigkeitsmenge, d. h. das in einem Cubikmeter Luft enthaltene Gewicht g Wasserdampf in Grammen; 2. der Dampfdruck δ des vorhandenen Wasserdampfes in Millimetern Quecksilber; 3. der relative Feuchtigkeitsgehalt f, d. h. das procentische Verhältniss g/G der wirklich vorhandenen Dampfmenge g zu derjenigen G, welche die Luft, wenn der Dampf in ihr für sich gesättigt wäre, bei der Temperatur t enthalten könnte, resp. durch das procentische Verhältniss des wirklichen Dampfdruckes δ zu dem maximalen Dampfdrucke $\varDelta$ bei der Temperatur t; es ist also

$$f = g/G \, . \, 100 \quad \text{oder} \quad f = \delta/\varDelta \, . \, 100;$$

die Grössen G und $\varDelta$ für die Temperatur t giebt die Tabelle 13.

Thaupunkt τ heisst die Temperatur, bei der der Dampf in der Luft bei dem vorhandenen Dampfgehalte von g Grammen für sich vollkommen gesättigt wäre, sich also bei einer beliebig kleinen Temperaturerniedrigung aus ihr in flüssiger Form abscheiden würde; man findet τ aus der Tabelle bei gegebenem g oder δ.

1. Bestimmung der Luftfeuchtigkeit durch Wägung.

Uebung. 1) Man wägt ein mit wasserfreiem, porösem Chlorcalcium gefülltes Rohr α; Gewicht P_1.

2) Man verbindet einen mit Wasser gefüllten Aspirator von bekanntem Inhalte (V Liter) mit einem Chlorcalciumrohr β, welches man mit dem Rohre α verbindet; das Rohr β hält die Feuchtigkeit des Aspirators von α ab.

3) Man liest die Lufttemperatur t_1 ab und lässt das Wasser langsam (ca. 10 Liter in der Stunde) aus dem Aspirator ausfliessen.

4) Man wägt das Rohr α wieder: Gewicht P_2, und liest die Lufttemperatur t_2 ab.

Die im Cubikmeter = 1000 Liter enthaltene Wasserdampfmenge ist dann für die mittlere Temperatur $t = \frac{1}{2}(t_1 + t_2)$

$$g = (P_2 - P_1) \,.\, 1000/V.$$

Beispiel: $P_1 = 35{,}974$, $P_2 = 36{,}100$ gr, $V = 13$ Liter, also: $g = 0{,}126 \,.\, 1000/13 = 9{,}7$ gr. Aus der Tabelle 13 ergiebt sich: $\tau = 10{,}5^0$ und $\delta = 9{,}5$ mm. Es war $t_1 = 17{,}8$, $t_2 = 19{,}25$, $t = 18{,}5^0$, also die entsprechende Maximalspannung $\varDelta = 15{,}9$ mm. Die relative Feuchtigkeit f beträgt demnach: $9{,}5/15{,}9 \,.\, 100 = 59{,}8$ Proc.

Bemerkung. Die Zahlen sind Mittelwerthe für die Feuchtigkeit während der Versuchsdauer. Um die Luftfeuchtigkeit in einem gegebenen Augenblick zu bestimmen, muss man sich einer der folgenden Methoden bedienen. Da der Wassergehalt der Luft sich fortwährend ändert, so sind auch die hier erhaltenen Zahlen nicht mit den im Folgenden ermittelten Werthen direct vergleichbar, selbst wenn die Feuchtigkeitsbestimmungen nach beiden Methoden zu gleicher Zeit angestellt werden.

2. Thaupunkt-Hygrometer.

Princip. Wir bestimmen den Feuchtigkeitsgehalt der Luft in einem bestimmten Zeitpunkte dadurch, dass wir die Temperatur der Luft ermitteln, bei welcher die vorhandene Dampfmenge eben hinreicht, die Luft zu sättigen; bei ihr schlägt sich der Wasserdampf in flüssiger Form an allen denjenigen Stellen nieder, an denen die Temperatur um einen geringen Betrag unter diesen Punkt (Thaupunkt) sinkt.

a) Daniell's Hygrometer.

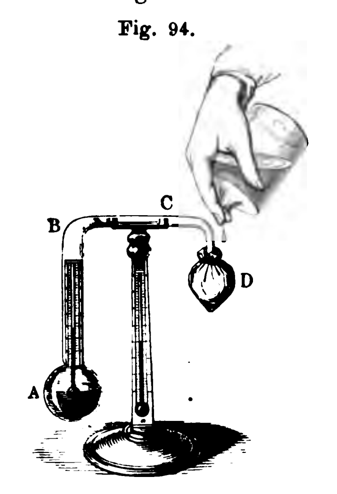
Apparat. Das Daniell'sche Hygrometer besteht aus zwei durch das weite, zweimal rechtwinklig umgebogene Glasrohr BC (Fig. 94) verbundenen Glaskugeln A und D, von denen A zur Hälfte mit Aether gefüllt ist. Aus dem Apparate ist die Luft entfernt, so dass er ausser dem flüssigen Aether nur Aetherdämpfe von einem Dampfdruck enthält, der der augenblicklichen Temperatur t entspricht. Die Temperatur liest man an dem Thermometer an der Säule ab. Das in BA befindliche Thermometer giebt die Temperatur des Aethers in A, und, da die Glaswand von A dünn ist, auch die Temperatur der Kugel A selbst an. A ist aussen zum Theil mit einer dünnen, spiegelnden Goldschicht umkleidet, D ist mit feiner Leinwand umwickelt. Um das Instrument nicht durch die Feuchtigkeit des Athmens zu beeinflussen, wird dasselbe durch eine Glasscheibe hindurch abgelesen.

Uebung. 1) Man liest die Temperatur der Luft t ab.

2) Man tröpfelt auf D Aether, dann kühlt sich bei der Verdunstung desselben die Kugel D und damit die in ihr enthaltenen Aetherdämpfe ab, welche sich zum Theil condensiren. In das dadurch entstehende partielle Vacuum destillirt aus A nach D Aether [1]). Dabei wird Wärme verbraucht, die der Kugel A entzogen wird. Diese kühlt sich ab.

3) Man verfolgt an dem in A eintauchenden Thermometer das Sinken der Temperatur und bestimmt die Temperatur τ, bei welcher sich auf der blanken Goldfläche ein leichter Hauch zeigt.

Fig. 94.



4) Man controlirt diese Ablesung dadurch, dass man bei dem nach einiger Zeit eintretenden Steigen der Temperatur in A die Temperatur ermittelt, bei welcher der Beschlag wieder verschwindet.

Der Versuch wird mehrmals aufsteigend und absteigend wiederholt und durch passendes Regeln des Befeuchtens von D die Unterkühlung unter den Thaupunkt von A vor dem Wiedererwärmen möglichst klein gemacht.

5) Aus der Tabelle 13 sucht man zu τ die Werthe von g oder δ.

Bemerkung. Die erhaltene Luftfeuchtigkeitsmenge g bezieht sich nicht auf Luft von t^0, sondern von τ^0. Da die Luft beim Abkühlen von t^0 bis zum Thaupunkt τ ihr Volumen verringert, so muss eine entsprechende Correction angebracht werden. Die in 1 cbm Luft von t^0 enthaltene Dampfmenge ist $g.(273 + \tau)/(273 + t)$. Ebenso ist die relative Feuchtigkeit $f.(273 + \tau)/(273 + t)$.

Beispiel: Bei einer Lufttemperatur von $t = 18{,}2^0$ beschlug die abgekühlte Kugel A, als ihr Thermometer $12{,}1^0$ zeigte. Der Thaupunkt τ ist also $= 12{,}1$, der Dampfdruck $\delta = 10{,}5$ mm, der Gehalt an Wasserdampf $g = 10{,}7$ gr im Cubikmeter. Der Factor $(273 + 12{,}1)/(273 + 18{,}2) = 0{,}985$ ist indess so nahe gleich 1, dass er keine Aenderung von g in den hier gezogenen Genauigkeitsgrenzen bedingt. Luft von $18{,}2^0$ könnte Wasser in Dampfform gerade noch enthalten, wenn der Dampfdruck $\Delta = 15{,}4$ mm ist, demnach war die relative Feuchtigkeit im Momente der Beobachtung $f = 10{,}5/15{,}4 . 100 = 68{,}2$ Proc. der maximalen.

b) Döbereiner-Regnault's Hygrometer.

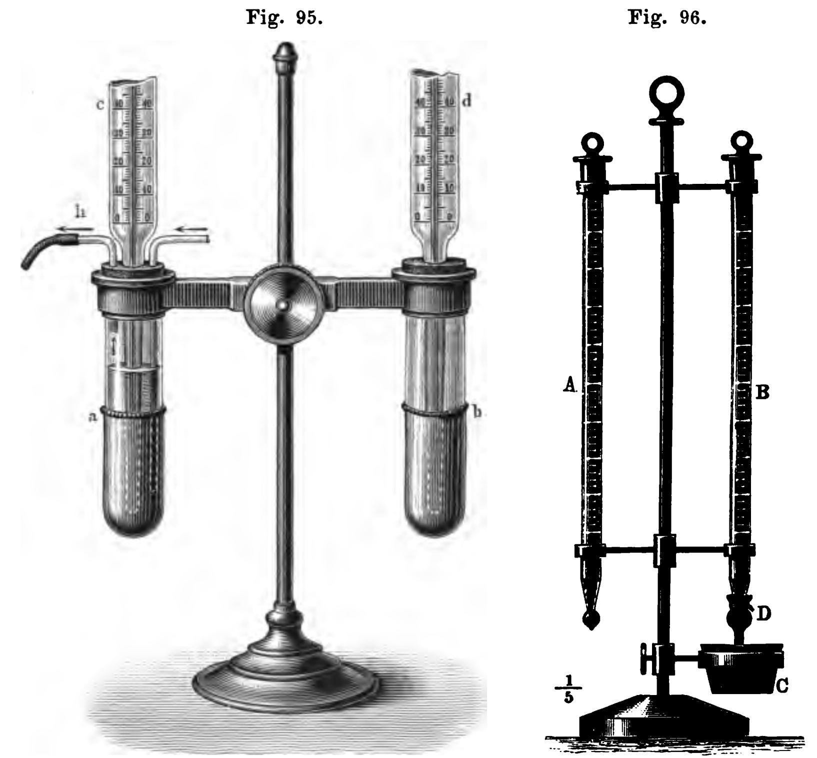
Apparat. Das mit dem unteren Ende in eine versilberte Metallkappe eingekittete Reagenzglas a wird mit Aether etwa so weit, wie es

---

[1]) Hat sich nach längerem Gebrauch in D eine grössere Menge Aether gesammelt, so bringt man ihn durch Neigen des Instrumentes nach A zurück.

die Fig. 95 zeigt, gefüllt und derselbe dadurch verdampft und abgekühlt, dass mittelst eines mit dem Kautschukschlauch *h* verbundenen Aspirators Luft hindurchgesaugt wird (Fig. 95). In den Aether in *a* taucht das Thermometer *c* ein, das in *b* befestigte Thermometer *d* misst die Lufttemperatur *t*, *b* ist wie *a* mit einer versilberten Kappe versehen;

Fig. 95. Fig. 96.



die sichere Erkennung des Beginnes des Niederschlages auf *a* wird durch den Vergleich erleichtert.

Uebung. 1) Man lässt das Wasser aus dem Aspirator ausfliessen, verfolgt das Sinken der Temperatur in *a* und beobachtet diejenige Temperatur τ, bei der der Beschlag eben zu sehen ist.

2) Durch geeignetes Regeln des Wasserausflusses aus dem Aspirator erhält man die Temperatur des Gefässes *a* dauernd auf dem Thaupunkte.

3) Man liest die Temperatur τ in *a* ab, bei der ein ganz leichter Hauch auf der polirten Silberfläche entsteht, der bei einer geringen Temperatursteigerung sofort wieder verschwindet.

Alles andere wie unter 2).

Beispiel: $\tau = 13{,}5$; $d = 11{,}4$ mm, $g = 11{,}5$ gr; $t = 19{,}2$; $D = 16{,}7$ mm; $f = 11{,}4/16{,}7 \cdot 100 = 68$ Proc.

3. Das (Differential-) Psychrometer nach August.

Princip. Je schneller die Verdunstung eines benetzten Thermometers stattfindet, um so stärker kühlt es sich ab. Die Schnelligkeit der Verdunstung ist um so grösser, je trockener die Luft, d. h. je geringer ihr Gehalt g an Wasserdampf ist. Es besteht also ein Zusammenhang zwischen Verdunstungsschnelligkeit und damit auch der Abkühlung eines benetzten Thermometers t' mit der Temperatur der Umgebung t und dem Feuchtigkeitsgehalte der Luft. Wir geben für diesen Zusammenhang keine Formel, sondern eine ihn darstellende Tabelle. Die Zahlen geben g bei den betreffenden Werthen von t und d.

t	$d=0^0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
−10	2,9	2,1	1,3	0,6								
− 9	3,1	2,3	1,5	0,7								
− 8	3,3	2,5	1,7	0,9	0,1							
− 7	3,5	2,7	1,9	1,1	0,3							
− 6	3,7	2,9	2,1	1,3	0,5							
− 5	4,0	3,1	2,3	1,5	0,7							
− 4	4,2	3,4	2,5	1,7	0,9	0,1						
− 3	4,5	3,6	2,8	1,9	1,1	0,3						
− 2	4,8	3,9	3,0	2,2	1,4	0,5						
− 1	5,1	4,2	3,3	2,4	1,6	0,8						
0	5,4	4,5	3,6	2,7	1,9	1,0	0,2					
+ 1	5,7	4,7	3,8	2,9	2,1	1,2	0,4					
+ 2	6,1	5,1	4,1	3,2	2,3	1,4	0,5					
+ 3	6,5	5,4	4,4	3,4	2,5	1,6	0,7					
+ 4	6,9	5,8	4,8	3,7	2,7	1,8	1,0					
+ 5	7,3	6,2	5,1	4,1	3,1	2,1	1,2	0,3				
+ 6	7,7	6,6	5,5	4,5	3,4	2,4	1,4	0,5				
+ 7	8,2	7,0	5,9	4,9	3,8	2,8	1,8	0,8				
+ 8	8,7	7,5	6,4	5,3	4,2	3,2	2,1	1,1	0,2			
+ 9	9,2	8,0	6,9	5,7	4,6	3,6	2,5	1,5	0,5			
+10	9,7	8,5	7,3	6,2	5,1	4,0	2,9	1,9	0,9			
+11	10,3	9,1	7,9	6,7	5,6	4,4	3,3	2,3	1,2	0,2		
+12	10,9	9,7	8,4	7,2	6,0	4,9	3,8	2,7	1,7	0,6		
+13	11,6	10,3	9,0	7,8	6,6	5,4	4,3	3,1	2,1	1,0		
+14	12,2	10,9	9,6	8,3	7,1	5,9	4,8	3,6	2,5	1,4	0,4	
+15	13,0	11,6	10,3	9,0	7,7	6,5	5,3	4,1	3,0	1,9	0,8	
+16	13,7	12,3	10,9	9,6	8,3	7,0	5,8	4,6	3,5	2,4	1,3	0,2
+17	14,5	13,1	11,6	10,3	9,0	7,7	6,4	5,2	4,0	2,9	1,7	0,7
+18	15,3	13,8	12,4	11,0	9,6	8,3	7,0	5,8	4,6	3,4	2,2	1,1
+19	16,2	14,7	13,2	11,7	10,3	9,0	7,7	6,4	5,1	3,9	2,8	1,6
+20	17,1	15,5	14,0	12,5	11,1	9,7	8,3	7,0	5,8	4,5	3,3	2,2
+21	18,1	16,5	14,9	13,4	11,9	10,5	9,1	7,7	6,4	5,1	3,9	2,7
+22	19,1	17,4	15,8	14,2	12,7	11,2	9,8	8,4	7,1	5,8	4,5	3,3
+23	20,2	18,5	16,8	15,2	13,6	12,1	10,6	9,2	7,8	6,4	5,2	3,9
+24	21,3	19,5	17,8	16,1	14,5	12,9	11,4	10,0	8,5	7,2	5,8	4,5
+25	22,5	20,6	18,9	17,1	15,5	13,8	12,3	10,8	9,3	7,9	6,5	5,2
+26	23,8	21,8	20,0	18,2	16,5	14,8	13,2	11,6	10,1	8,7	7,3	5,9
+27	25,1	23,1	21,2	19,3	17,5	15,8	14,2	12,6	11,0	9,5	8,1	6,7
+28	26,4	24,4	22,4	20,5	18,7	16,9	15,2	13,5	11,9	10,4	8,9	7,5
+29	27,9	25,8	23,7	21,7	19,8	18,0	16,3	14,6	12,9	11,3	9,8	8,3
+30	29,4	27,2	25,1	23,0	21,1	19,2	17,4	15,6	13,9	12,3	10,7	9,1

Apparat. Von zwei an demselben Stative befestigten, gleichen Thermometern A und B (Fig. 96, a. S. 160) ist die Kugel des einen mit Leinwand D umwickelt; ein an diese angenähter Docht taucht in das in dem Gefässe C enthaltene Wasser. Das Wasser steigt im Docht zu der Hülle D empor und hält sie dauernd feucht. In Folge der hier fortwährend stattfindenden Verdunstung des Wassers kühlt sich D und damit auch das Thermometer B ab; das feuchte Thermometer B steht tiefer als das trockene Thermometer A, welches die Lufttemperatur anzeigt.

Aus der beobachteten Differenz d der Temperatur des Thermometers B und der Lufttemperatur t findet man die in einem Cubikmeter Luft enthaltene Dampfmenge in Grammen aus der Tabelle S. 161.

Uebung. 1) Man befeuchtet das Thermometer B, indem man das Gefäss C einen Augenblick so hoch hebt, dass die Kugel von B ganz eintaucht, und überlässt das Instrument eine Zeit lang sich selbst.

2) Man bewegt das Instrument hin und her, damit die Luft an ihm vorbeistreicht. Häufig sind die beiden Thermometer an einem federnden Stabe befestigt, man bewegt dann vor dem Ablesen die Thermometer dadurch, dass man den Träger zur Seite biegt und ihn zurückschnellen lässt.

3) Man liest die Temperatur t' des feuchten und diejenige des trockenen Thermometers t ab.

Zu t und $d = t - t'$ sucht man g aus der Tabelle S. 161.

Beispiel: $t' = 15{,}7$; $t = 18{,}6$; $d = 2{,}9$. Die Tafel liefert: $g = 11{,}5$ gr. Hieraus aus der Tabelle 13 der Thaupunkt $\tau = 13{,}4^0$ und der wirkliche Dampfdruck $\delta = 11{,}5$ mm. Für $t = 18{,}6$ ist der Maximaldruck $\varDelta = 15{,}9$ mm, also die relative Feuchtigkeit $f = 72$ Proc.

4. Saussure's Haarhygrometer.

Princip. Viele organische Körper haben die Eigenschaft, Wasserdampf zu absorbiren und sich dabei auszudehnen, so Haare, die man durch Auskochen mit sehr schwacher Kalilauge entfettet hat.

Apparat. Ein Haar wird oben in einer Zwinge bei d (Fig. 97) befestigt, unten um das Röllchen o geschlungen und durch ein Gegengewicht p gespannt, welches an einem um das Röllchen gewundenen Faden hängt. Mit o ist ein Zeiger verbunden, der auf einer 100 Theile umfassenden Scala spielt. Durch die Schraube bei a wird das Haar in eine solche Stellung gebracht, dass der Zeiger auf Null zeigt, wenn das Instrument in absolut trockener Luft hängt, etwa unter einer Glocke, welche gleichzeitig eine Schale mit concentrirter Schwefelsäure enthält. Der Durchmesser des Röllchens ist so gewählt, dass der Zeiger auf 100 zeigt, wenn das Haar in mit Wasserdampf völlig gesättigter Luft seine grösste Länge erreicht, wenn z. B. das Instrument unter

einer Glocke hängt, deren Wände reichlich mit destillirtem Wasser befeuchtet sind.

Das Instrument ist von Zeit zu Zeit zu controliren, indem man die Punkte für 0 und 100 Proc. Feuchtigkeit prüft, was zweckmässig vor den Uebungen geschieht.

Fig. 97.

Die Theilstriche der Scala zwischen 0 und 100 geben die relative Feuchtigkeit in Procenten. Da die Länge der Haares mit wachsender Feuchtigkeit anfangs schneller, allmählich aber immer langsamer wächst, so werden die Scalentheile mit wachsenden Zahlen immer kleiner. Die Scala wird vom Verfertiger auf Grund vergleichender Versuche entworfen; die relative Feuchtigkeit wird direct abgelesen. An älteren Haarhygrometern findet man noch vielfach Scalen, bei denen der Bogen zwischen 0 und 100 in 100 gleiche Theile getheilt ist. Eine Reductionstabelle dient dann dazu, die Scalentheile in relative Feuchtigkeiten umzurechnen.

Uebung. 1) Man befestigt das Hygrometer hinter einer Glasscheibe an einem Stativ und macht eine Reihe von Ablesungen A, während gleichzeitig der mittlere Feuchtigkeitsgehalt direct durch Wägung (nach 1) ermittelt wird.

2) Man reducirt eventuell nach der Reductionstabelle.

VI. Gefrierpunktserniedrigungen und Siedepunktserhöhungen von Lösungen.

Einleitung. Löst man in einer Flüssigkeit einen festen oder flüssigen Körper, so wird dadurch die Erstarrungstemperatur, der Gefrierpunkt, derselben erniedrigt.

Liegt der Gefrierpunkt der Lösung von p gr Substanz in 100 gr Lösungsmittel um Δ_g^0 niedriger, als derjenige des reinen Lösungsmittels, so nennt man den Werth

$$\gamma = \Delta_g / p,$$

d. h. die von 1 gr Substanz in 100 gr Lösungsmittel hervorgebrachte Erniedrigung die „specifische Gefrierpunktserniedrigung". Dieselbe ist bei verdünnten Lösungen eine von der Concentration ziemlich unabhängige Grösse; daraus folgt:

Jeder Körper, der in einer Flüssigkeit, die der Erstarrung fähig ist, gelöst ist, erniedrigt deren Gefrierpunkt und zwar nahezu proportional der Concentration.

Multiplicirt man die specifische Gefrierpunktserniedrigung mit dem Moleculargewicht M der gelösten Substanz, so erhält man die moleculare Gefrierpunktserniedrigung Γ; es ist dies diejenige Gefrierpunktserniedrigung, welche eintreten würde, wenn eine dem Moleculargewicht M entsprechende Menge in 100 gr Lösungsmittel enthalten wäre

$$\Gamma = M\gamma = M . \Delta_g / p.$$

Für die Constante Γ gilt der folgende Satz:

Die molecularen Erniedrigungen des Gefrierpunktes nähern sich für jedes Lösungsmittel einer für dasselbe charakteristischen Constante Γ.

Löst man in einer flüchtigen Flüssigkeit p gr eines nichtflüchtigen Körpers, so wird dadurch der Siedepunkt um Δ_s erhöht. Für die Erhöhung des Siedepunktes Δ_s gelten dieselben Sätze wie für die Erniedrigung des Gefrierpunktes. — Man erhält für die specifische und die moleculare Siedepunktserhöhung:

$$\sigma = \Delta_s / p, \quad \Sigma = M\sigma = M . \Delta_s / p.$$

Die Grössen Γ und Σ haben folgende Werthe:

$$\Gamma = \frac{0{,}02}{W_g} T_g^2 \quad \text{und} \quad \Sigma = \frac{0{,}02}{W_s} T_s^2.$$

T_g und T_s ist der Gefrierpunkt resp. der Siedepunkt in absoluter Temperatur, also von — 273° an gerechnet, W_g und W_s ist die latente Schmelzwärme, resp. die latente Verdampfungswärme des Lösungsmittels.

Aus den obigen Gleichungen ergiebt sich bei bekanntem Γ, p und Δ_g, resp. Σ, p und Δ_s das Moleculargewicht:

$$M = \Gamma . p / \Delta_g \quad \text{und} \quad M = \Sigma . p / \Delta_s.$$

Man kann daher durch Bestimmungen der Gefrierpunktserniedrigungen und Siedepunktserhöhungen in Lösungen von bekanntem Gehalt an gelöster Substanz das Moleculargewicht der letzteren bestimmen.

1. Erniedrigung des Gefrierpunktes von Lösungen.

Gebraucht wird: Beckmann'scher Gefrierpunktsapparat nebst Zubehör, Pastillenpresse.

Princip der Methode. Man bestimmt den Gefrierpunkt t_0 für das Lösungsmittel, den Gefrierpunkt t_1 für die Lösung von G gr Substanz in 100 gr Lösungsmittel, dann ist das Moleculargewicht:

$$M = \Gamma . G/(t_0 - t_1).$$

Hat man P gr Substanz in L gr Lösungsmittel gelöst, so sind in 100 gr Lösungsmitttel $G = 100\,P/L$ gelöst.

Man bestimmt Γ, indem man für eine Lösung eines Körpers mit bekanntem Moleculargewicht die Gefrierpunktserniedrigung ermittelt.

Der Gefrierpunkt t_0 und die Constante Γ, die moleculare Gefrierpunktserniedrigung, haben folgende Werthe bei

Essigsäure . . .	$t_0 = 16{,}7^0$	$\Gamma = 39$
Naphtalin. . . .	$t_0 = 80{,}1^0$	$\Gamma = 70$
Phenol.	$t_0 = 43^0$	$\Gamma = 70$
Benzol.	$t_0 = 5{,}4^0$	$\Gamma = 50$

Bei Wasser liegen die Verhältnisse sehr complicirt (siehe weiter unten). Die Lösungen der meisten organischen Substanzen (nicht Salze) in Wasser geben $\Gamma = 19$, die Salze der Alkalimetalle mit starken Säuren 38, die der Erdalkalimetalle verschiedene Werthe, so dass eine Bestimmung der Gefrierpunktserniedrigungen in Wasser nur unter besonderen Umständen zur Ermittelung des Moleculargewichtes verwendbar ist.

Apparat nach Beckmann. Die zu untersuchende Substanz wird in das Gefäss A (Fig. 98, a. f. S.) (2,5 cm weit, 21 cm lang) mit dem seitlichen Ansatz A' gebracht; A steckt in einem 3,5 cm weiten Gefäss B, das Luft enthält, und dieses in einem Gefäss C (11 cm Durchmesser) mit Eis resp. einer Kältemischung. In A befindet sich ein Platinrührer r, sowie einige Platinschnitzel und das in 0,01° C. getheilte Thermometer D. Die Capillare am oberen Ende des letzteren ist umgebogen und erweitert. Treibt man durch Erwärmen grössere oder kleinere Mengen Quecksilber in die Erweiterung c und löst sie durch einen leichten seitlichen

Schlag von dem darunter befindlichen Faden ab, so kann man dasselbe Thermometer bei verschiedenen Temperaturen benutzen, ohne dass die Scala gar zu lang zu sein braucht. Bei Versuchen mit hygroskopischen Lösungsmitteln, wie Essigsäure, steckt man in den A verschliessenden Kork ein ├-Stück von Glas. Durch den verticalen Theil desselben geht der Rührer auf und ab, durch den horizontalen Theil leitet man einen langsamen Strom von getrockneter Luft ein [1]).

Fig. 98.



Bei Versuchen mit Benzol wird klein gestossenes Eis und Wasser in C gefüllt, bei solchen mit Wasser eine Mischung von Eis und Kochsalz. Zum Ablassen des Schmelzwassers dient ein kleiner, durch die Oeffnung a einzuführender Heber mit Saugrohr. Der ganze Apparat steht in einer Blechwanne.

Zum Abwägen der Substanz dienen u. a. Glaseimer von ca. 4 mm Weite und 6 mm Höhe, die beim Wägen in Messingständer gestellt werden.

Der Rührer wird durch eine über eine Rolle gehende Schnur bewegt.

Uebung 1. Gefrierpunktserniedrigungen in Benzol. Schmelzpunkt: $5{,}4^0$ C. $= 278{,}4^0$ absolute Temperatur; latente Schmelzwärme $= 29$ cal., also ist der theoretische Werth von $\Gamma = 55$. Wir legen hier den empirischen Werth $\Gamma' = 50$ zu Grunde.

Moleculargewichtsbestimmung. Vorversuch: Man setzt das Thermometer und den Rührer in ein Gefäss A_1, das mit einer das Thermometergefäss bedeckenden Menge Benzol gefüllt ist, und kühlt dieses ab, indem man es durch die Oeffnung b direct in die Kältemischung setzt, bis Erstarrung eintritt, und ermittelt zunächst angenähert den Gefrierpunkt, nachdem man

---

[1]) Man kann auch das Rohr ganz schliessen und den Rührer durch einen Elektromagneten bewegen.

den Quecksilberfaden des Thermometers in der oben angedeuteten Weise so verlängert oder verkürzt hat, dass das Fadenende sich bequem beobachten lässt.

1) Man wägt ein zweites Gefäss A mit den Platinschnitzeln: Gewicht P_1.

2) Man füllt in A etwa 10 gr Benzol oder weniger, jedenfalls nicht viel mehr als nöthig ist, damit das Quecksilbergefäss des Thermometers ganz eintaucht und wägt: Gewicht P_2.

$P_2 - P_1 = L$ ist das Gewicht des angewandten Lösungsmittels.

3) Man setzt Thermometer und Rührer in das Gefäss A und stellt dieses durch die Oeffnung b in das Eis.

4) Man kühlt unter beständigem Umrühren bis in die Nähe des Gefrierpunktes ab und setzt das Gefäss in den Luftmantel B. Das Thermometer fällt langsam und gleichmässig bis einige Zehntel Grade unter den Gefrierpunkt. Bei fortgesetztem gleichmäsigen Rühren beginnt dann plötzlich das Thermometer wieder zu steigen, erst schnell, dann langsamer, und stellt sich auf einen bestimmten Punkt ein, den es dauernd innehält; dieses ist der Gefrierpunkt t_0.

5) Man nimmt das Gefäss A wieder aus dem Mantel B heraus, stellt es einige Zeit an die Luft und setzt es wieder in B ein, wenn fast alle Benzolkrystalle verschwunden sind. Die etwas über den Gefrierpunkt t_0 gestiegene Temperatur fällt rasch wieder, dann tritt plötzlich die umgekehrte Bewegung und endlich die schliessliche Einstellung ein.

Man muss ununterbrochen rühren; sowohl bei den Erwärmungen als auch bei den Unterkühlungen soll sich die Temperatur nicht allzu weit von dem Gefrierpunkte t_0 entfernen.

6) Man führt die Operationen 5) einige Male aus und bildet aus den erhaltenen Zahlen das Mittel t_0.

7) Man wägt einen kleinen Glaseimer mit dem Fuss. Gewicht p_1.

8) Man wägt ihn mit Pikrinsäure [$C_6H_2(OH)(NO_2)_3 = 229$]. Gewicht p_2. Das Gewicht der angewendeten Substanz ist $p = p_2 - p_1$.

9) Der Eimer wird mit der Pincette durch den Ansatz A' in das Gefäss A gebracht.

10) Nachdem sich alle Pikrinsäure gelöst hat, bestimmt man, wie in 4) und 5), die Erstarrungstemperatur t_1.

11) Man wägt eine zweite Menge p' Pikrinsäure ab und löst sie in dem Gefässe A.

12) Man bestimmt die Erstarrungstemperatur t_2.

Berechnung. 1) Die Gefrierpunktserniedrigungen bei 10) und 12) sind $e_1 = t_0 - t_1$ und $e_2 = t_0 - t_2$. Im zweiten Falle sind $P = p + p'$ gr gelöst. Es verhält sich $e_2 : e_1 = P : p$.

2) Bei dem ersten Versuche ist $G_1 = 100\,p/L$, bei dem zweiten $G_2 = 100\,P/L$, woraus sich das Moleculargewicht M nach der Formel zu M_1 bezw. M_2 berechnet. Man nimmt das Mittel aus M_1 und M_2.

Bemerkung. Viele Substanzen kann man mit einer Pastillenpresse zu einer Pastille zusammenpressen, die man dann ohne Glaseimer direct in das Gefäss A wirft.

Beispiel: $P_1 = 47,120$; $P_2 = 64,569$; $L = 17,449$ gr; $t_0 = 0,520$, $0,522$, $0,520$, $0,520$; Mittel $0,520$; $p_1 = 6,319$; $p_2 = 6,382$; $p = 0,063$ gr; $t_1 = 0,440$, $0,440$, $0,440$, $0,440$; Mittel $t_1 = 0,440$; $e_1 = t_0 - t_1 = 0,080$; $p'_1 = 6,272$; $p'_2 = 6,340$; $p' = 0,068$ gr; $P = p' + p = 0,131$; $t_2 = 0,365$; $e_2 = t_0 - t_2 = 0,155$; $P:p = 2,1$; $e_2:e_1 = 1,9$; $G_1 = 0,36$; $G_2 = 0,75$; $M_1 = 220,5$; $M_2 = 237$; Mittel $M = 229$.

Uebung 2. Gefrierpunktserniedrigungen in Wasser. [Schmelzpunkt bei 273° (absolut); Schmelzwärme 80 Cal., also $\Gamma = 19$.]

a) Man wägt ein Gefriergefäss A, füllt es mit Wasser und verfährt genau wie oben mit Chlorkalium ($KCl = 74,5$), setzt aber das Gefäss A in eine Kältemischung aus Kochsalz und Eis von etwa $-5°$.

Das sich bei der Berechnung ergebende Moleculargewicht ist nur halb so gross als das wirkliche.

Beispiel: $L = 20,240$; $p = 0,167$ gr; $t_0 = 3,694$; $t_1 = 3,274$; $e = t_0 - t_1 = 0,420$; $G = 0,825$; $M = 37,3$. In Wirklichkeit ist $M = 74,6 = 2 \times 37,3$.

b) Man führt die Bestimmung für Rohrzucker ($C_{12}H_{22}O_{11} = 342$) durch; für das Moleculargewicht ergiebt sich der normale Werth.

Beispiel: $L = 17,350$; $p = 0,153$; $t_0 = 4,022$; $t_1 = 4,070$; $e = 0,048$; $G = 0,882$; $M = 340$.

2. Erhöhung des Siedepunktes von Lösungen.

Gebraucht wird: Siedegefässe mit Zubehör (Fig. 99, 100 und 101); Waage.

Princip der Methode. Man bestimmt den Siedepunkt T_0 für das Lösungsmittel, den Siedepunkt T_1 für die Lösung von G gr Substanz in 100 gr Lösungsmittel, dann ist das Moleculargewicht

$$M = \Sigma \,.\, G/(T_1 - T_0),$$

wo Σ die oben definirte Constante ist.

Hat man P gr in L gr Lösungsmittel gelöst, so sind in 100 gr Lösungsmittel $G = 100 \,.\, P/L$ gr gelöst.

Man bestimmt Σ, indem man für eine Lösung eines Körpers mit bekanntem Moleculargewicht die Siedepunktserhöhung ermittelt.

Der Siedepunkt T_0 und die Constante Σ, die moleculare Siedepunktserhöhung haben folgende Werthe bei

Anilin	$T_0 = 184°$	$\Sigma = 32,2$
Wasser	$T_0 = 100°$	$\Sigma = 5,2$
Benzol	$T_0 = 80,3°$	$\Sigma = 26,1$
Aethylalkohol . .	$T_0 = 78°$	$\Sigma = 11,5$
Chloroform . . .	$T_0 = 63°$	$\Sigma = 35,9$
Aethyläther . .	$T_0 = 35°$	$\Sigma = 21,1$

Apparate nach Beckmann (Fig. 99 und 100). Apparat Fig. 100 für Lösungsmittel mit dem Siedepunkte bis etwa 130°.

Das Siedegefäss A besitzt zwei seitliche Ansätze t_1 und t_2. t_1 dient zum Einbringen der Substanz, t_2 zum Einführen eines inneren Kühlers, A setzt sich nach unten bis über den angepassten Ausschnitt einer Asbestpappe L fort und ruht mit dem Boden auf einem Drahtnetze D. Unterhalb des Verschlussstopfens r wird das Siederohr durch eine gewöhnliche Stativklammer N gehalten. Gegen äussere Abkühlung schützt ein Glascylinder G, den man durch Absprengen eines Lampencylinders erhält und der nach oben durch eine dünne Platte aus Glimmer oder Aehnlichem abgeschlossen wird.

Bei Substanzen, die über 100° sieden, genügt blosse Luftkühlung, bei unter 100° siedenden kommt der Kühler K in Anwendung. Das äussere Wasserrohr von K wird durch Glasansätze verhindert, am Tubus anzuliegen und grössere Schichten Flüssigkeit zurückzuhalten. Um zu vermeiden, dass Tropfen condensirter Flüssigkeit auf einmal in das Siedegefäss zurückfallen, was erhebliche Temperaturschwankungen zur Folge haben kann, reicht das Kühlrohr nicht ganz bis in das Siedegefäss hinein und ist am unteren Ende aufgeblasen und seitlich zusammengedrückt. Beim Anheizen vergrössert man die Flamme, bis die Flüssigkeit völlig siedet und das Thermometer um einige hundertstel Grade steigt. Um ein Ueberhitzen zu vermeiden und ein regelmässiges Sieden zu bewirken, wird der Boden des Gefässes

Fig. 100.

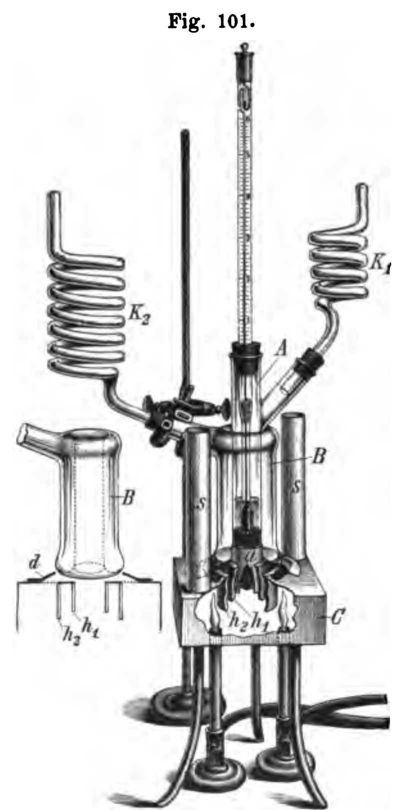
Fig. 99.

mit einem **Füllmaterial**, mit Glas, Granaten oder besonders zweckmässig mit aus zusammengerolltem Platinblech hergestellten Platintetraëdern gefüllt.

Apparat Fig. 101 für Lösungsmittel mit dem Siedepunkte oberhalb 130°.

Das Siedegefäss *A* (Fig. 101), welches dieselbe Form wie das Gefriergefäss (S. 98) hat, ist 2,5 cm weit und $3^1/_2$ bis 4 cm hoch und mit einem Füllmaterial gefüllt (vgl. oben). Um dieses innere Gefäss, in dem das Thermometer befestigt ist, schliesst sich der besonders abgebildete Dampfmantel *B*, in dem beim Versuch etwa 20 cbcm Lösungsmittel (nach Zufügen einer ausreichenden Menge poröser Thonstückchen zur Erleichterung des Siedens) in beständigem Sieden erhalten werden. Der Zwischenraum zwischen Siedegefäss und Dampfmantel ist unten mit einer hervorstehenden Hülse *a* aus Asbestpapier, oben mit etwas Asbestwolle ausgefüllt. Beide Gefässe, *A* und *B*, tragen die Rückflusskühlröhren K_1 und K_2. Das auf einem Dreifuss ruhende Heizkästchen *C*, dessen Einrichtung durch einen Verticalschnitt verdeutlicht ist, besteht aus Asbestpappe und lässt sich durch Verkleben mit Wasserglas leicht herstellen.

Fig. 101.



Die zum Heizen dienenden Bunsenbrenner werden seitlich vom Dampfmantel aufgestellt. Wo die Flammen auf die Heizfläche treffen, befinden sich mit Drahtnetz und Asbestpapier bedeckte sichelförmige Ausschnitte, die ihrerseits von dem Rande *d* eines Asbestschälchens überwölbt werden. Die Ringe h_1 und h_2 aus Asbestpappe schützen das Siedegefäss vor directer Flammenwirkung; *ss* sind Abzugsröhren aus Asbestpapier für die Verbrennungsgase. Die dem Dampfmantel zugeführte Wärme ist gewöhnlich ausreichend, um auch die innere Flüssigkeit zum vollen Sieden zu bringen, anderenfalls heizt man das innere Siedegefäss noch direct mit kleiner Flamme. Das richtige Sieden wird an der sich constant einstellenden Temperatur erkannt.

Zum Eintragen der Substanz in das siedende Lösungsmittel dient

bei Flüssigkeiten die kleine Pipette, Fig. 99, die zweckmässig in Cubikcentimeter getheilt ist, feste Körper werden meist in Form von Pastillen eingeführt.

Uebung. 1) Man wägt das Gefäss A leer; sein Gewicht sei P; man wägt es mit Flüssigkeit: Gewicht P_1.

2) Man stellt den Apparat zusammen und erhitzt zunächst mit stärkerer Flamme bis zum Sieden und regulirt dieselbe so lange, bis während fünf Minuten die Temperatur sich nicht um mehr als ein tausendstel Grad ändert. Man erhält so die Siedetemperatur des reinen Lösungsmittels T_0. Dieselbe wird ebenfalls erreicht, wenn man der lebhaft siedenden Flüssigkeit Granaten, Platinschnitzel bis zur Constanz der Temperatur hinzufügt.

3) Man bringt etwa π' gr (0,3 bis 0,5 gr) Substanz ein, die etwa 0,1^0 Erhöhung liefern, und bestimmt den Siedepunkt T_3' der Lösung.

4) Man bringt weitere Mengen π''... ein und bestimmt die Siedepunkte der Lösung T_1''...

Berechnung. Das Gewicht des angewandten Lösungsmittels ist

$$\Pi = P_1 - P.$$

In 100 gr Lösungsmittel sind enthalten bei den auf einander folgenden Versuchen:

$$p' = 100\,\pi'/\Pi, \quad p'' = 100\,(\pi' + \pi'')/\Pi \text{ etc. gr Substanz.}$$

$T_1 - T_0$ hat man aus den Versuchen erhalten, Σ ist aus der Tabelle zu entnehmen, so dass man alle Daten zur Berechnung von M hat.

Allgemeines.

Die Bildung von Hydraten, Benzolaten, überhaupt Verbindungen des gelösten Körpers mit Molecülen des Lösungsmittels, bei denen sich an ein Molecül des ersteren ein oder mehrere Molecüle des letzteren anlagern, ist auf die Bestimmung des Moleculargewichtes bei den in Betracht kommenden sehr verdünnten Lösungen ohne Einfluss auf das Resultat, wenn es sich nur darum handelt, zu bestimmen, ob das Moleculargewicht das einfache, doppelte oder dreifache etc. des aus der Analyse ermittelten ist. Denn dadurch, dass sich in sehr verdünnten Lösungen aus dem Lösungsmittel einige Molecüle an die gelösten Körper anlagern, wird die Concentration der Lösungen nur sehr wenig geändert.

Anders gestaltet sich aber die Sache, wenn in der Lösung mehrere chemische Molecüle zu einem physikalischen verbunden sind; dann muss das Moleculargewicht zu gross gefunden werden. Dasselbe ist der Fall, wenn in den Lösungen nicht ein Molecül der gelösten Substanz mit einem Molecül des Lösungsmittels zusammentritt, sondern letzteres mehrere der ersteren zusammenhält.

In diesen Fällen muss man die Gefrierpunktserniedrigungen resp. Siedepunktserhöhungen in verschiedenen Lösungsmitteln bestimmen. Findet in einigen eine solche Aneinanderlagerung statt, so werden die in ihnen erhaltenen Werthe des Moleculargewichtes wesentlich von einander abweichen. Versuche mit einem einzigen Lösungsmittel können falsche Ergebnisse liefern.

Bei concentrirten Lösungen ergeben sich für die specifische Gefrierpunktserniedrigung γ folgende Fälle: sie bleibt entweder mit wachsendem Gehalt an Substanz constant, oder nimmt zu oder ab. Dabei ist es gleichgültig, ob die Lösung eine nicht gesättigte, gesättigte oder übersättigte ist, der Durchgang durch den Sättigungspunkt ändert nichts an der Erscheinung. Dieser Gang von γ ist vielfach auf Zusammenlagerungen von Molecülen zurückgeführt worden.

Die Verhältnisse in verdünnten Lösungen haben in neuerer Zeit eine ausnehmend grosse Wichtigkeit erlangt. Das im Folgenden für die Gefrierpunktserniedrigungen Gesagte gilt fast wörtlich auch von den Siedepunktserhöhungen.

Bei Wasser stimmt der experimentell aus den Gefrierpunktserniedrigungen gefundene und der theoretisch berechnete Werth von Γ bei allen Nichtelektrolyten, also vor Allem bei den organischen Substanzen, soweit sie nicht Salze sind, innerhalb gewisser Concentrationen überein ($\Gamma = 19{,}0$).

Diese Substanzen sind danach mit dem für sie aus chemischen Methoden ermittelten Moleculargewicht M in den Lösungen vorhanden, d. h. es befinden sich in der Lösung so viel Molecüle, als sich aus dem Werthe M berechnet.

Bei Elektrolyten ist der gefundene Werth von Γ stets grösser als der berechnete, er wächst mit der Verdünnung und nimmt je nach der Natur der untersuchten Salze bei sehr grosser Verdünnung die Grenzwerthe 2×19, 3×19 etc. an. Der Grenzwerth $2 \times 19 = 38$ wird bei allen den Salzen erreicht, welche bei der Elektrolyse in zwei Ionen zerfallen, also nach dem Typus MS zusammengesetzt sind, wo M ein beliebiges einwerthiges positives Metallion, S ein einwerthiges negatives Säureradicalion ist, gleichgültig, ob diese Ionen einfach oder zusammengesetzt sind. Hierher gehört z. B. KCl, KBr etc., $NaNO_3$, $AgNO_3$ etc.

Der Grenzwerth $3 \times 19 = 57$ wird erreicht bei Verbindungen des Typus M_2S'' und $M''S_2$, wo M'' und S'' zweiwerthige, M und S einwerthige positive oder negative Ionen sind. Hierher gehören z. B. K_2SO_4, $BaCl_2$ u. a.

Ein experimentell gefundener Werth von Γ, der grösser ist als der nach Formel S. 165 berechnete, bedeutet nach der Theorie, dass in der Lösung mehr Molecüle enthalten sind, als sich aus der chemischen Formel ergeben würde.

Um dies zu erklären, hat Sv. Arrhenius unter Benutzung älterer

Anschauungen von R. Clausius die Theorie der elektrolytischen Dissociation aufgestellt. Er nimmt an, dass die Salze in wässerigen Lösungen ganz oder theilweise in ihre Bestandtheile, die Ionen (s. bei Elektrolyse), zerfallen, so z. B. KCl in $\overset{+}{K}$ und $\overset{-}{Cl}$; dann würde in der That, wenn wir ein Molecül KCl lösen, in der Lösung ein Ion $\overset{+}{K}$ und ein Ion $\overset{-}{Cl}$ enthalten sein, die Zahl der getrennt vorhandenen Theile also verdoppelt sein.

Dass z. B. das K nicht, wie man erwarten sollte, auf das Wasser wirkt, dass in der Lösung von KJ in Stärkekleister das J letzteren nicht bläut, wird aus den elektrischen Ladungen der Atome erklärt, durch welche dieselben wesentlich andere Eigenschaften als die elektrisch neutralen Molecüle, die sonst der Beobachtung zugänglich sind, erhalten. Diese Theorie der elektrolytischen Dissociation hat sich auf vielen, sowohl rein chemischen als physikalisch chemischen Gebieten als vorzügliches Hülfsmittel für die Erklärung der Thatsachen erwiesen.

Eine genauere Untersuchung hat gezeigt, dass auch bei anderen Lösungsmitteln die Verhältnisse nicht so einfach liegen, wie oben angenommen wurde. Die Brauchbarkeit der Methoden zur Bestimmung der Moleculargewichtsbestimmung wird dadurch indess nur in sehr geringem Grade beeinträchtigt.

VII. Specifische Wärme fester und flüssiger Körper.

Einleitung.

Bisher haben wir die Volumenänderungen, Druckänderungen etc. gemessen, die bei Temperaturänderungen auftreten. Jeder physikalische und chemische Process ist aber ausserdem mit einer Wärmeentwickelung oder einem Wärmeverbrauch (einer negativen Wärmeentwickelung) verbunden, im ersten Falle tritt eine Erwärmung, im zweiten Falle eine Abkühlung ein. J. Thomsen bezeichnet die positive und negative Wärmeentwickelung mit dem Namen Wärmetönung. Mit diesen Wärmetönungen beschäftigen wir uns jetzt.

Wird ein Process in einem dem ursprünglichen Sinne entgegengesetzten durchlaufen, so kehrt sich das Vorzeichen der Wärmetönung um, der absolute Betrag bleibt derselbe. So ist z. B. die positive Condensationswärme gleich der negativen Verdampfungswärme.

Die wichtigsten thermischen Grössen sind ausser der Temperatur und dem mechanischen Wärmeäquivalent (s. w. u.) die folgenden:

I. Bei Vorgängen an einem einzelnen Körper:

1) Specifische Wärme; 2) latente Schmelzwärme (Erstarrungswärme); 3) latente Dampfwärme (Condensationswärme); 4) Umwandlungswärme (z. B. bei der Umwandlung von monoklinem Schwefel in octaëdrischen).

II. Bei Vorgängen, bei denen wenigstens zwei Körper zusammentreten oder sich aus einem Körper deren zwei bilden:

1) Benetzungs- und Adsorptionswärme, wenn Flüssigkeiten und Gase sich auf festen Körpern verdichten; 2) Mischungswärme bei der Mischung zweier gegen einander chemisch indifferenter Flüssigkeiten (Benzol und Toluol); 3) Mischungswärme zweier gegen einander chemisch nicht indifferenter Flüssigkeiten (Alkohol und Wasser); 4) Verdünnungswärme (bei weiterem Zusatz von Mengen der einen Componente des Gemisches); 5) Lösungswärme (Krystallisationswärme) und Absorptionswärme; 6) Additionswärme und Hydratationswärme ($CaCl_2$ und $6H_2O$); 7) Verbindungswärme (Trennungswärme) im strengen Sinne des Wortes, wenn die Atome als solche zu einem Molecül zusammentreten und nicht erst aus anderen Molecülen abgeschieden werden müssen; 8) Verbindungswärme im gewöhnlichen Sinne des Wortes, die eigentlich eine Umsetzungswärme ist, wenn die zu einem Molecül zusammentretenden

Atome erst aus anderen Molecülen losgelöst werden müssen: $H_2 + J_2 = 2HJ$, $C_2 + O_2 = 2CO$; 9) Umsetzungswärme: $HCl + KBr = HBr + KCl$, $H_2SO_4 + 2KNO_3 = K_2SO_4 + 2HNO_3$; 10) Neutralisationswärme, specieller Fall von 9), bei dem die beiden sich umsetzenden Körper eine Säure und eine Base sind: $KOH + HCl = KCl + H_2O$; 11) Verbrennungswärme.

Definition: Einheit der Wärmemengen ist eine Calorie. Eine Calorie ist diejenige Wärmemenge, welche man braucht, um die Gewichtseinheit Wasser von 0^0 bis 1^0 zu erhitzen.

Man unterscheidet zwischen grossen Calorien (Cal.), wenn man das Kilogramm, und kleinen Calorien (cal.), wenn man das Gramm als Gewichtseinheit zu Grunde legt. W. Ostwald hat für thermochemische Zwecke eine weitere Calorie *K* vorgeschlagen, die gleich 100 kleinen ist; es ist die Wärmemenge, die 1 gr Wasser abgiebt, wenn es sich von 100^0 auf 0^0 abkühlt.

Wir betrachten zunächst die unter I. 1) aufgeführte Grösse, die specifische Wärme.

Definitionen. Die wahre specifische Wärme eines Körpers bei t^0 ist diejenige in Calorien gemessene Wärmemenge, welche man braucht, um die Gewichtseinheit des Körpers bei t^0 um 1^0 zu erhitzen.

Die mittlere specifische Wärme zwischen zwei Temperaturen t_1 und t_2 ist diejenige Wärmemenge, welche man brauchen würde, um innerhalb dieses Temperaturintervalles 1 gr eines Körpers um 1^0 zu erhitzen, falls sich die wahre specifische Wärme zwischen t_1 und t_2 nicht änderte. Braucht man zum Erhitzen eines Grammes von t_1 bis t_2 die Wärmemenge Q, so ist die mittlere specifische Wärme:

$$c = Q/(t_2 - t_1).$$

Man bestimmt meist mittlere specifische Wärmen und berechnet aus ihnen dann die wahren.

Atomwärme ist diejenige Wärmemenge, welche man braucht, um das in Grammen ausgedrückte Atomgewicht (vgl. S. 6) des betreffenden Körpers um 1 Grad zu erhitzen. Ist A das Atomgewicht, c die specifische Wärme, so ist die Atomwärme

$$W_{At} = A \,.\, c.$$

Molecularwärme ist die zur Erhitzung des in Grammen ausgedrückten Moleculargewichtes um 1 Grad nöthige Wärmemenge. Ist M das Moleculargewicht, c die specifische Wärme, so ist die Molecularwärme

$$W_{Mol} = M \,.\, c \text{ (vergl. S. 6).}$$

Bei den im Folgenden anzustellenden Bestimmungen werden für jeden einzelnen Fall die Atom- bezw. Molecularwärmen berechnet. (Vgl. hierzu Atomvolumen und Molecularvolumen S. 72.)

Wasserwerth w eines Apparates etc. nennt man diejenige Wärmemenge, welche man braucht, um ihn um 1° zu erhitzen; sie giebt an, wie vielen Gramm Wasser der Apparat in thermischer Hinsicht äquivalent ist; er ist bei homogenen Substanzen gleich dem Product aus dem Gewicht p und der specifischen Wärme σ, also $w = p\sigma$.

Von den zur Messung der specifischen Wärmen dienenden Methoden behandeln wir 1) die Mischungsmethode, 2) die Strahlungsmethode.

1. Die Mischungsmethode.

Gebraucht wird: Calorimeter mit Rührer im Wassermantel mit Holzklotz und Pappdeckel (Fig. 105); Thermometer im Stativ mindestens in $^1/_5{}^0$ getheilt; Erwärmungsgefässe nach Pfaundler und Pettersson (Fig. 102 u. 103); Neumann'scher Hahn (Fig. 104); Brenner; Stative; kleines Calorimeter (vgl. S. 179); Waage, Kupferstücke, Bleistücke, Aluminiumstücke, Graphit, Glasstücke, Zinkblende, Bleiglanz.

Erwärmungskörper (S. 182); Quecksilberbad; Stativ; Brenner; Terpentinöl; Calorimeter; Glasgefässe mit Messingfuss; Rohr zum Füllen und Entleeren derselben; Waage mit Gewichten.

Einleitung.

Princip. Man erhitzt einen Körper vom Gewicht P auf die Temperatur T, mischt ihn mit einem Körper vom Gewicht p von der Temperatur t und bestimmt die nach völligem Wärmeaustausch beiden gemeinsame Endtemperatur τ. Ist C die specifische Wärme des ersten Körpers, c diejenige des zweiten, so ist

$$PC(T - \tau) = pc(\tau - t),$$

denn $PC(T - \tau)$ cal. ist diejenige Wärmemenge, welche P gr Substanz von der specifischen Wärme C abgeben, wenn sie sich von T bis τ abkühlen, während $pc(\tau - t)$ cal. nöthig sind, um p gr des Körpers von der specifischen Wärme c von t bis τ zu erwärmen.

Als zweiten Körper benutzt man stets eine Flüssigkeit. Dieselbe ist in einem Gefässe enthalten, welches man das Calorimeter nennt. Das Calorimeter nimmt an der Erwärmung Theil. Ist q sein Gewicht, σ die specifische Wärme seines Materials, so ist $w = q \, . \, \sigma$ sein Wasserwerth [1]). Ebenso wird der in die Flüssigkeit tauchende Theil des Thermometers mit erwärmt, sein Wasserwerth δ muss bestimmt werden (s. S. 179).

Die obige Gleichung lautet unter Berücksichtigung der Wasserwerthe des Calorimeters und des Thermometers:

$$PC(T - \tau) = (pc + w + \delta)(\tau - t).$$

$$C = \frac{(pc + w + \delta)(\tau - t)}{P(T - \tau)} \quad \ldots\ldots \quad 1)$$

[1]) Für das bei den folgenden Apparaten verwandte Messing kann man hinreichend genau $\sigma = 0{,}1$ setzen.

Nimmt man als calorimetrische Flüssigkeit, wie es meist geschieht, Wasser mit der specifischen Wärme [1]) $c = 1$, so ist

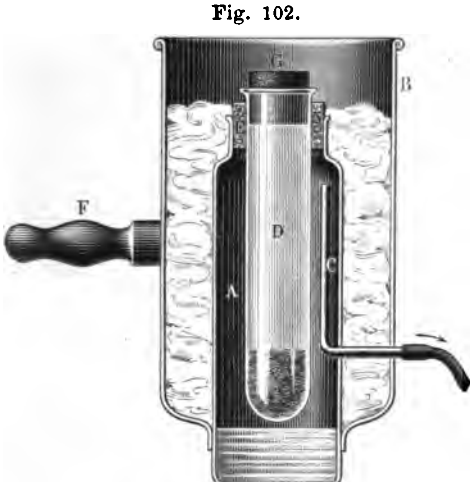
$$C = \frac{(p + w + \delta)(\tau - t)}{P(T - \tau)} \quad \ldots \ldots \quad 2)$$

Ist die Wassermenge im Calorimeter gross, so kann man den Wasserwerth des Thermometers δ gegen $p + w$ vernachlässigen und erhält:

$$C = \frac{(p + w)(\tau - t)}{P(T - \tau)} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3)$$

Diese Gleichung setzt voraus, dass bis zur Messung der theoretischen Endtemperatur der Mischung die ganze dem Calorimeter zugeführte Wärme in demselben bleibt, also nicht durch Leitung oder Strahlung fortgeführt wird, und dass ebenso dem Calorimeter nicht von aussen Wärme zugeführt wird. Dies ist aber nur der Fall, wenn der erhitzte Körper, wie bei gut leitenden Metallen, mit dem Wasser im Calorimeter sich sehr schnell in das Wärmegleichgewicht setzt. Man erkennt dies daran, dass das Thermometer in dem Calorimeter rasch seinen höchsten Stand erreicht; andernfalls muss der Ausstrahlung und Leitung Rechnung getragen werden (s. w. u.).

Fig. 102.



Apparate. 1. Erwärmungsapparate. a) Das Kupfergefäss A (Fig. 102), welches zur Aufnahme der Erwärmungsflüssigkeit (Wasser) dient, die durch eine Flamme zum Sieden erhitzt wird, ist in den Kupfermantel B hart eingelöthet. Der Zwischenraum zwischen A und B ist mit einem schlechten Wärmeleiter, z. B. Watte, ausgestopft. Aus A führt das knieförmig gebogene Rohr C durch B

---

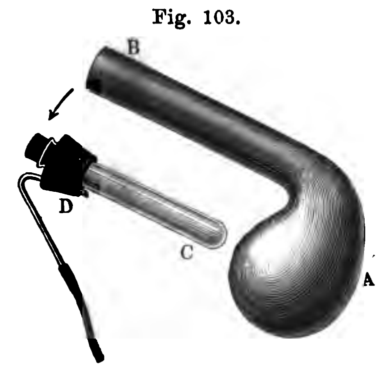
1) Wir setzen die specifische Wärme des Wassers gleich 1, nehmen also an, dass wir stets eine Calorie brauchen, um die Gewichtseinheit Wasser um 1^0 zu erhitzen. In Wirklichkeit ist nach Dieterici die wahre specifische Wärme c bei t^0:

t	c	t	c	t	c
0^0	1	40^0	0,9934	80^0	1,0182
10^0	0,9943	50^0	0,9995	90^0	1,0244
20^0	0,9893	60^0	1,0057	100^0	1,0306
30^0	0,9872	70^0	1,0120		

Die mittlere specifische Wärme zwischen 0 und 100^0 ist $c_m = 1{,}0045$.

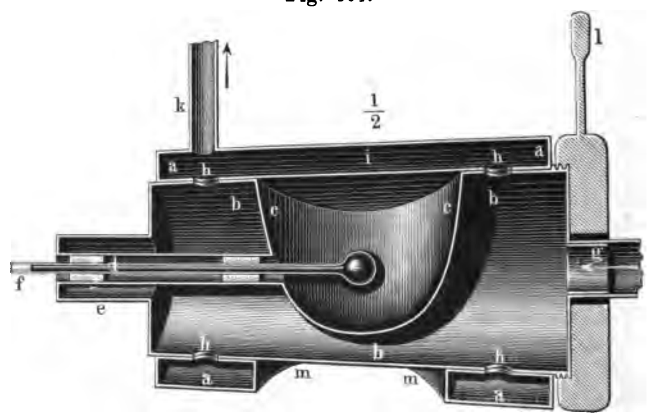
nach aussen; durch dasselbe gelangen die Wasserdämpfe nach einem mit kaltem Wasser gefüllten Gefässe, wo sie sich condensiren. In das Rohr *D*, entweder ein Reagirglas oder ein unten geschlossenes Metallrohr, wird der zu erwärmende Körper gebracht; *D* ist mit *A* durch den Stopfen *E* fest verbunden. Neigt man das Gefäss, indem man es an dem Holzgriffe *F* fasst, so fallen die erwärmten Stücke aus *D* heraus, ohne dass die Flüssigkeit in *A* mit ausfliesst. Zum Schutze gegen Strahlung und Luftströmungen wird das Rohr *D* durch den locker aufgesetzten Stopfen *G* geschlossen. Der obere Raum von *B* wird während des Erwärmens mit einem Wattebausch ausgestopft (Form von Pfaundler).

Fig. 103.



b) In die kupferne Retorte *A* (Fig. 103) passt bei *B* der Stopfen *D* mit dem Rohr *C* und dem Röhrchen *D*. *A* wird zum Theil mit Wasser gefüllt, *D* aufgesetzt und der zu erhitzende Körper in *C* gebracht. Erhitzt man *A*, so wird *C* von den Dämpfen umspült, die durch *D* und den angesetzten Schlauch zum Condensationsgefässe fortgeleitet werden. Um den Körper aus *C* in das Calorimeter zu bringen, neigt man den

Fig. 104.



Hals nach vorn, im Sinne des Pfeiles, dann fällt der Körper heraus, ohne dass Flüssigkeit herausfliesst [1]) (Form von Pettersson).

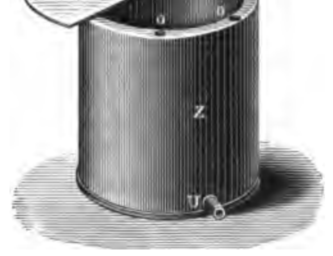
c) Neumann'scher Hahn (Fig. 104). Innerhalb des Raumes *cc* des abgestumpften Kegels *bc* befindet sich der zu untersuchende Körper;

[1]) Durch den *D* (Fig. 102), resp. *C* (Fig. 103) verschliessenden Kork kann man noch ein Thermometer stecken.

er wird durch Dämpfe, die bei g eintreten, dann durch die Oeffnungen h in den Mantel a gelangen und durch k entweichen, erwärmt. Dreht man an dem Hebel l den Hohlkegel b um 180°, so fällt der Körper aus cc in das darunter gestellte Calorimeter.

2. Calorimeter (Fig. 105). Dieselben bestehen aus dünnwandigen vernickelten Messinggefässen M[1]) (z. B. 6 cm hoch, 7½ cm weit). Sie stehen auf cylindrischen Holzklötzen N. Die Rührer R bestehen aus einem auf einen Messingdrahtring gelötheten Drahtnetz; sie haben einen Ausschnitt für das Thermometer T.

Fig. 105.



Die Calorimeter werden in doppelwandige Messingblechgefässe Z gestellt (20 cm hoch, 18 cm weit). Der Zwischenraum wird durch eine der Oeffnungen O mit Wasser gefüllt, welches bei U abgelassen wird. Das Gefäss Z wird nach Einsenken des Calorimeters mit zwei halbkreisförmigen Pappdeckeln P zugedeckt, welche für das Thermometer und die Rührer passend ausgeschnitten sind. Die Calorimeter befinden sich so in einem Raume von nahezu constanter Temperatur.



1. Bestimmung des Wasserwerthes eines Thermometers.

Princip. Man erwärmt das Thermometer und taucht es in eine abgewogene Menge Wasser w von der Temperatur t_0. Zeigt das Thermometer unmittelbar vor dem Eintauchen T^0, im Wasser aber t^0, nachdem die Temperaturen sich vollständig ausgeglichen haben, so ist $w(t - t_0)$ die dem Wasser zugeführte Wärmemenge. Ist δ der Wasserwerth des Thermometers, so ist:

$$\delta(T - t) = w(t - t_0) \quad \text{und} \quad \delta = w.(t - t_0)/(T - t).$$

Apparat. Das Wasser wird in einem 18 cm hohen, 1½ cm weiten Cylinder aus dünnem Messingblech abgewogen. Das Gewicht des Gefässes ist so gering, dass man seinen Wasserwerth vernachlässigen kann. Dasselbe wird auf einem Kork, in einem Messingmantel vor Strahlung geschützt, aufgestellt.

---

[1]) Will man Säuren untersuchen, so muss man Platingefässe benutzen; Glasgefässe geben ungenaue Resultate, da in Folge der schlechten Wärmeleitung nicht die ganze Masse des Glases sogleich die Temperatur der in ihnen enthaltenen Flüssigkeiten annimmt.

Uebung. 1) Man bestimmt das Gewicht des Wassers w.

2) Man stellt das Gefäss in den Schutzmantel, senkt das Thermometer ein und wartet, bis dasselbe eine constante Temperatur t_0 anzeigt.

3) Man hebt das Thermometer heraus, lässt abtropfen und erwärmt es in einem Wasserbade.

4) Man trocknet das Thermometer, führt es in den Calorimetermantel, liest seine Temperatur T ab und steckt es schnell in das Calorimeter.

5) Man wartet, bis die Temperatur constant geworden ist. Sie sei t.

Beispiel: $w = 12{,}6$ gr; $t_0 = 18{,}2^0$; $T = 73{,}0$; $t = 19{,}7$; $\delta = 0{,}35$.

2. Bestimmung der specifischen Wärme von festen Körpern.

A. Versuche ohne Rücksicht auf Strahlungsverluste.

Zu den Versuchen werden etwa 0,5 cm² grosse, 0,5 bis 1 mm dicke Kupfer-, Blei- und Aluminiumstücke und Graphitstücke von etwa gleichem Volumen verwendet. Bei ihnen geht die Temperaturabgabe so rasch vor sich, dass man den Temperaturverlusten des Calorimeters (S. 181) in den meisten Fällen nicht Rechnung zu tragen braucht.

Uebung. 1) In eines der Erwärmungsgefässe [1]) wird so viel Wasser gegossen, dass das eingesenkte Reagirglas nicht von demselben berührt wird. Das Reagirglas wird mit den Metallstücken zu zwei Drittel locker gefüllt, der dasselbe tragende Stopfen fest aufgesetzt und das Ganze erwärmt. Die sich entwickelnden Dämpfe werden abgeleitet und in kaltem Wasser condensirt.

2) Das abseits stehende Calorimeter wird mit Wasser von Zimmertemperatur etwa bis zur Hälfte gefüllt und mit dem Rührer auf den Holzklotz in dem Calorimetermantel Z gesetzt, das Thermometer eingesenkt, und der Pappdeckel P (Fig. 105) aufgelegt. Zwischen Erhitzungsgefäss und Calorimeter wird eventuell noch ein Pappschirm aufgestellt. Man erwärmt 15 Minuten lang bei kräftiger Dampfentwickelung.

3) Man liest die Temperatur des Calorimeters ab, sie sei t, nimmt das Erwärmungsgefäss von der Flamme und wirft durch rasches Umkippen die Metallstücke in das Calorimeter. Wenn einige Stücke daneben fallen oder im Reagirglase hängen bleiben oder endlich etwas von dem Calorimeterwasser verspritzt wird, so verliert darum die Messung nichts von ihrer Brauchbarkeit [2]). Nur darf nichts von

---

[1]) Beim Neumann'schen Hahn wird die Substanz nach cc (Fig. 104) gebracht, dann der Hahn eingesetzt und das Rohr g durch Schlauch mit einer grossen Kochflasche verbunden, in der man die Erwärmungsflüssigkeit zum Verdampfen erhitzt.

[2]) Da dies bei noch nicht erlangter Uebung häufig vorkommt, so empfiehlt es sich, alle Wägungen erst nach dem Einwerfen der Metallstücke auszuführen.

dem heissen Wasser oder den Dämpfen in oder an das Calorimeter gelangen.

4) Man deckt den Calorimetermantel wieder zu und verfolgt unter fortwährendem Rühren, wobei der Rührer mit den Metallstücken aber immer unter Wasser bleiben muss, das Steigen der Temperatur. Dieselbe erreicht sehr bald ein Maximum, das sie kurze Zeit beibehält, um dann gleichmässig zu sinken. Die höchste erreichte Temperatur ist die dem Calorimeter und den Metallstücken gemeinsame Endtemperatur τ.

5) Man nimmt das Thermometer aus dem Calorimeter, lässt sorgfältig abtropfen und wägt das Ganze; Gewicht P_1.

6) Das Wasser wird abgegossen, die Metallstücke werden mit Fliesspapier getrocknet, ebenso Calorimeter und Rührer getrocknet und das Ganze wieder gewogen: Gewicht P_2. Dann ist das Gewicht des Calorimeterwassers $p = P_1 - P_2$.

7) Man entfernt die Metallstücke und wägt das Calorimetergefäss mit dem Rührer allein: Gewicht q. Dann ist der Wasserwerth des Calorimeters mit Rührer $w = q\sigma$ ($\sigma = 0{,}094$ oder rund 0,1) und $P = P_2 - q$ das Gewicht der Metallstücke.

8) Man liest den Barometerstand ab und entnimmt der Tabelle 12 die Siedetemperatur des Wassers.

Die Berechnung erfolgt nach Formel 3, S. 159.

Beispiel: Kupfer ($Cu = 63$) $t = 17{,}4^0$; $\tau = 19{,}7^0$; $T = 99{,}2^0$; $P_1 = 231{,}2$; $P_2 = 70{,}0$; $p = 161{,}2$; $q = 20{,}3$; $P = 49{,}7$ gr; $w = q\sigma = 2{,}0$; $p + w = 162{,}2$; $C = 0{,}095$; $W_{At} = 6{,}0$. Ebenso wurde gefunden für Blei ($Pb = 206$) $C = 0{,}031$, also $W_{At} = 6{,}3$; für Graphit ($C = 12$) $C = 0{,}25$; $W_{At} = 3{,}0$.

B. Versuche mit Berücksichtigung der Strahlung[1]).

Ist die in das Calorimeter eingebrachte Substanz nicht ein so guter Wärmeleiter, dass sie sich in kurzer Zeit mit der Flüssigkeit desselben in das Temperaturgleichgewicht setzt, so muss die durch Strahlung an die Umgebung abgegebene Wärme berücksichtigt werden; dies geschieht dadurch, dass man eine Zeit lang nach dem Einbringen des Körpers von Minute zu Minute den Gang des Thermometers verfolgt; erst steigt das Thermometer schnell zu einem Maximum und fällt dann erst langsam, dann immer schneller und schneller; in dieser Periode wird noch ein Theil der Strahlung durch Zufuhr aus dem Inneren compensirt, endlich wird der Abfall constant, etwa δ^0 in einer Minute; derselbe rührt von der Strahlung her und der Körper befindet sich mit der Calorimeterflüssigkeit in thermischem Gleichgewicht. Durch die Strahlung allein würde die Temperatur in jeder Minute um δ^0

---

1) Wir setzen voraus, dass der Körper kein gar zu schlechter Wärmeleiter ist, oder die Stücke nicht gar zu gross sind.

sinken. Hat der Versuch bis zum Constantwerden des Sinkens n Minuten gedauert, so entspricht der Wärmeverlust durch Strahlung einer Temperaturdifferenz $n\delta$.

Ist die Temperatur zu dieser Zeit t_x, so ergiebt sich für die Maximaltemperatur in erster Annäherung beim Mischen des Körpers und der Flüssigkeit, falls keine Strahlung vorhanden gewesen wäre:

$$\tau = t_x + n\delta.$$

Uebung. 1) bis 3) wie bei A.

3a) Man liest die Temperatur t_0 des Calorimeters unmittelbar vor dem Einwerfen des erhitzten Körpers ab.

4) Man liest nach dem Einbringen desselben von Minute zu Minute die Temperaturen ab, sie seien $t_1 t_2 t_3 \ldots$; man bildet die Differenzen $t_2 - t_1$, $t_3 - t_2 \ldots$ und verfolgt den Gang noch etwa 5 bis 10 Minuten, bis die Differenzen constant geworden sind.

5) bis 7) wie bei A.

Beispiel: Glasstücke: $t_0 = 15{,}8^0$; $t_2 = 18{,}3$; $t_4 = 18{,}5$; $t_6 = 18{,}5$; $t_8 = 18{,}5$; $t_{20} = 18{,}5$; $t_{24} = 18{,}4$; $t_{28} = 18{,}3$; $\delta = \frac{1}{4} 0{,}1^0$; $n\delta = 20{,}0 \,.\, 0{,}025 = 0{,}5$; $t_x = 18{,}5$; $\tau = 18{,}5 + 0{,}5 = 19{,}0$; $T = 98{,}2$; $P_1 = 259{,}4$; $P_2 = 59{,}4$; $p = P_1 - P_2 = 200{,}0$; $q = 21{,}6$; $P = 37{,}8$ gr; $q\sigma = 2{,}2$; $C = 0{,}22$. **Ebenso wurde gefunden für Zinkblende** ($ZnS = 97$) $C = 0{,}12$, **also** $W_{Mol} = 11{,}6$; **für Bleiglanz** ($PbS = 238$) $C = 0{,}5$, **also** $W_{Mol} = 11{,}9$.

3. Bestimmung der specifischen Wärme von Flüssigkeiten.

A. Methode von Andrews.

Princip. Taucht man einen erwärmten Körper in eine Flüssigkeit von einer niedrigeren Temperatur t und der specifischen Wärme C, so wird durch die von dem erwärmten Körper abgegebene Wärme die Temperatur der Flüssigkeit erhöht, etwa bis auf T^0. Ist P das Gewicht der Flüssigkeit, w der Wasserwerth des Calorimeters, so ist die abgegebene Wärmemenge $(PC + w)(T - t)$. Taucht man denselben Körper in eine andere Flüssigkeit vom Gewichte P', der specifischen Wärme C' und der Temperatur t', und wird durch die gleiche abgegebene Wärmemenge die Temperaturerhöhung $(T' - t')$ erzielt, so ist:

$$(PC + w)(T - t) = (P'C' + w)(T' - t').$$

Ist die zweite Flüssigkeit Wasser, so ist $C' = 1$ zu setzen und man erhält:

$$C = \frac{P' + w}{P} \frac{T' - t'}{T - t} - \frac{w}{P}.$$

Apparat. Der Erwärmungskörper besteht aus einer dünnwandigen, mit Quecksilber gefüllten Glaskugel von ca. 2 cm Durchmesser. An diese ist ein 60 cm langes, ca. 0,5 mm weites Capillarrohr angeschmolzen, welches sich oben zu einer kleinen Kugel erweitert. An dem Rohre sind mehrere Marken angebracht; in der Nähe der obersten steht der

Quecksilberfaden, wenn die Kugel auf etwa 90° erhitzt wird, in der Nähe der untersten bei etwa 30°. Bei der Abkühlung giebt dieser Erwärmungskörper immer dieselbe Wärmemenge ab, wenn der Faden um den Abstand der beiden Marken sinkt. — Die Kugel wird über einer Flamme mit Drahtnetz erhitzt. Als Calorimeter dient ein 5 cm weites, 9 cm hohes Gefäss aus dünnem vernickelten Messingblech, welches von einem Wassermantel umgeben ist.

Uebung. 1) Man wägt das Calorimeter; Gewicht q.

2) Man füllt das Calorimeter bis zur Hälfte mit Terpentinöl und wägt; Gewicht P_1. $P = P_1 - q$ ist das Gewicht des Terpentinöles.

3) Man stellt das Calorimeter in den Mantel, senkt das Thermometer ein und deckt das Ganze zu (vgl. S. 179).

4) Man erhitzt den Erwärmungskörper, bis der Faden etwas über der oberen Marke steht.

5) Man liest die Temperatur t des Calorimeters ab und taucht den von der Flamme genommenen Erwärmungskörper in dem Augenblicke in die Flüssigkeit, in dem das sinkende Fadenende bei der oberen Marke vorbeigeht.

6) Man verfolgt unter stetem Umrühren mit dem Erwärmungskörper die Temperatur des Calorimeters und liest die Temperatur T des Calorimeters ab, bei der das Fadenende an einer der unteren Marken vorbeigeht.

7) Man trocknet das Calorimeter, füllt es mit Wasser und wägt wieder; Gewicht P_2. Dann ist $P' = P_2 - q$ das Gewicht des Wassers.

8) Die folgenden Manipulationen entsprechen den unter 3) bis 6) angeführten vollständig. Man erhält die Anfangstemperatur t' und die Endtemperatur T'.

Beispiel: $q = 23{,}1$; $w = q\sigma = 2{,}0$. Terpentin ($C_{10}H_{16} = 136$): $P = 68{,}3$ gr; $t = 18{,}1$; $T = 32{,}0$; $T - t = 13{,}9$. Wasser: $P' = 72{,}4$ gr: $t' = 16{,}5$; $T' = 22{,}3$; $T' - t' = 5{,}8$; $C = 0{,}44$; $W_{Mol} = 57$.

B. Methode von Kopp.

Princip. Die Flüssigkeiten, deren specifische Wärme man bestimmen will, werden in ein Glasgefäss vom Gewichte P' gebracht, mit diesem bis auf die Temperatur T erwärmt und dann in das mit Wasser gefüllte Calorimeter gebracht, wobei sich dasselbe von der Anfangstemperatur t bis zur Endtemperatur τ erwärmt. Ist P das Gewicht der angewendeten Flüssigkeit, C ihre specifische Wärme, $\sigma_1 = 0{,}2$ ca. die specifische Wärme des Glases, w der Wasserwerth des Calorimeters, p das Gewicht des in ihm enthaltenen Wassers, so ist: $(PC + P'\sigma_1)(T - \tau) = (p + w)(\tau - t)$, und:

$$C = \frac{(p + w)(\tau - t)}{P(T - \tau)} - \frac{\sigma_1 P'}{P}.$$

Apparat. Zur Aufnahme der Flüssigkeiten dienen dünnwandige Glasgefässe von 4 cm Höhe und 2 cm Weite, mit 10 cm langem Halse. Die Füllung und Entleerung erfolgt, wie S. 140 angegeben. Beim Abwägen werden sie in Cylinder gesetzt, ähnlich den Fig. 54 abgebildeten. Diese Gefässe werden im Quecksilberbade erhitzt. Ein kleiner, mit Quecksilber gefüllter Eisenblechcylinder wird von einem Drahtdreiecke in einem Wasserbade gehalten. In das Quecksilber wird der untere weitere Theil der Glasgefässe getaucht, welche durch ein Stativ untergetaucht gehalten werden. Ein zweiter Arm desselben Stativs hält das Thermometer. Zum Umrühren des Quecksilberbades dient ein aus einem dünnen Glasstabe gebogener Rührer. Das Calorimeter ist ein 8,5 cm hoher, 5,5 cm weiter Messingcylinder. Statt des netzförmigen Rührers wird ein ringförmiger benutzt. Wassermantel wie oben S. 179.

Uebung. 1) Man wägt das Calorimeter mit Rührer; Gewicht p_1.

2) Nachdem man das Calorimeter bis zu ca. 6 cm Höhe mit Wasser von Zimmertemperatur gefüllt hat, wägt man, Gewicht p_2, stellt das Calorimeter in den Wassermantel und taucht das Thermometer ein.

3) Man wägt das Glasgefäss leer; Gewicht P'.

4) Man füllt das Gefäss mit Flüssigkeit und wägt; Gewicht P'_1.

5) Man erhitzt das Gefäss im Quecksilberbade bis auf T^0.

6) Man liest die Temperatur des Calorimeters t ab, bringt das Gefäss rasch aus dem Bade in das Calorimeter und liest die Endtemperatur τ ab, sowie den Gang der Temperatur, da sich die Temperatur nur relativ langsam ausgleicht; daraus berechnet man dann die Endtemperatur τ', welche eingetreten wäre, wenn keine Wärme durch Strahlung verloren ginge (vgl. S. 181).

Untersucht wird Terpentinöl.

Beispiel: $p_1 = 15{,}2$; $w = 1{,}5$; $p_2 = 71{,}8$; $p = 56{,}6$; $P' = 3{,}7$; $P'_1 = 14{,}9$; $P = 11{,}2$ gr; $T = 78{,}2$; $t = 18{,}7$; $\tau' = 24{,}5$; $C = 0{,}49$.

2. Strahlungsmethode.

Gebraucht wird: Grösserer Blechtopf (etwa 22 cm hoch, 27 cm im Durchmesser), der mit Wasser von der Zimmertemperatur gefüllt ist; Messinggefäss (18 cm hoch, 15 cm im Durchmesser), aussen blank, innen geschwärzt; durchbohrtes Brett mit Gewichten zum Auflegen; Calorimeter (Fig. 105) mit Thermometer und Kork; ein Wasserbad; ein Stativ; Terpentinöl; Waage mit Gewichten; Coordinatenpapier; Petroleumlampe zum Anrussen des Calorimeters.

Princip. 1) Ist T die Temperatur eines Körpers, t die constante Temperatur seiner Umgebung, wobei $T > t$, so ist die Wärmemenge q, welche der Körper in jeder Zeiteinheit ausstrahlt, bezw. an die umgebende Luft (s. w. u.) abgiebt, abhängig von dem Temperaturüberschuss $T - t$ und der Beschaffenheit seiner Oberfläche. Für nicht zu

grosse Temperaturdifferenzen ist q proportional dem Temperaturüberschusse, und man kann in erster Annäherung setzen:

$$q = \varepsilon (T - t),$$

wo ε eine von der Natur der Oberfläche abhängige Constante ist (vergl. auch w. u.). Ist bei zwei Körpern die Oberflächenbeschaffenheit die gleiche, so strahlen sie bei derselben Temperatur in der gleichen Zeit die gleiche Wärmemenge aus. Die durch Strahlung verloren gegangene Wärmemenge Q wird dem Wärmevorrath des Körpers entnommen.

Ist c die mittlere specifische Wärme des Körpers zwischen T_1 und T_0, p sein Gewicht und kühlt sich der Körper in der Zeit Z von T_1 bis T_0 ab, so ist die durch Strahlung abgegebene Wärmemenge:

$$Q = pc(T_0 - T_1).$$

Lässt man zwei Körper von den Gewichten p_1 und p_2 und den mittleren specifischen Wärmen c_1 und c_2 zwischen den Temperaturen T_0 und T_1 sich durch Strahlung von T_0 bis T_1 abkühlen, so sind die dabei ausgestrahlten Wärmemengen:

$$Q_1 = p_1 c_1 (T_0 - T_1) \qquad Q_2 = p_2 c_2 (T_0 - T_1).$$

Die zur Ausstrahlung dieser Wärmemengen bei derselben Temperatur t der Umgebung erforderlichen Zeiten Z_1 und Z_2 verhalten sich bei gleicher Oberflächenbeschaffenheit der beiden Körper, wie diese Wärmemengen selbst, d. h.: $Z_1 : Z_2 = Q_1 : Q_2$ oder $Z_1 : Z_2 = p_1 c_1 : p_2 c_2$ und

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{Z_1 p_2}{Z_2 p_1}.$$

2) Man füllt in dasselbe Gefäss vom Wasserwerthe w einmal Wasser (specifische Wärme c_1) und dann die zu untersuchende Flüssigkeit F, deren specifische Wärme c_2 man ermitteln will, bringt das Gefäss auf eine höhere Temperatur, lässt es in einer Umgebung von constanter Temperatur abkühlen und notirt dabei die Zeiten Z_1 und Z_2, welche erstens das mit Wasser gefüllte, zweitens das mit der Flüssigkeit F gefüllte Gefäss braucht, um sich von derselben Anfangstemperatur T_0 bis zu derselben Endtemperatur T_1 abzukühlen. Dann ist ganz analog wie oben:

$$Z_1/Z_2 = (p_1 c_1 + w)/(p_2 c_2 + w)$$

oder

$$c_2 = \frac{1}{p_2}\left[p_1 c_1 \frac{Z_2}{Z_1} + w \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1}\right].$$

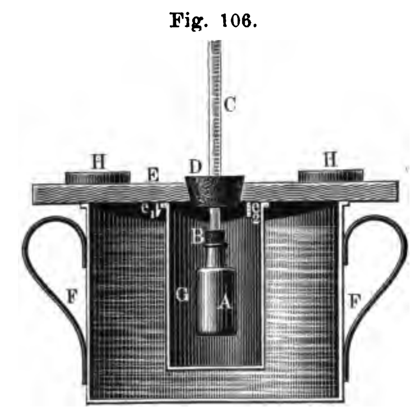
Das Verfahren setzt voraus, dass der Wärmeaustausch zwischen Oberfläche und Innerem des strahlenden Körpers ein vollkommener ist; dasselbe ist demnach vorwiegend zur Ermittelung der specifischen Wärmen von Flüssigkeiten geeignet.

Apparat. Zur Aufnahme der Flüssigkeiten dient das ca. 5 cm hohe, 3 cm im Durchmesser haltende Gefäss A (Fig. 106) aus ver-

nickeltem Messingblech. In den cylindrischen Hals wird der mit einer Längsfurche versehene Kork B fest eingesetzt, durch welchen das Thermometer C geführt ist. Ueber das Thermometer ist der grosse Kork D geschoben; er passt in eine kreisförmige Oeffnung des Brettes E.

Einen Raum von hinreichend constanter Temperatur erhält man dadurch, dass man das Messinggefäss G in die in dem Topfe F enthaltene Wassermasse von Zimmertemperatur setzt; man legt das Brett E auf G; E trägt an seiner Unterseite drei Stifte e_1, e_2, e_3, durch welche G gerade in der Mitte von E festgehalten wird. Den Auftrieb compensirt man durch die Gewichte H. G ist innen geschwärzt. Die Wassermasse in F ist so gross, dass ihre Temperatur in Folge der durch die Ausstrahlung von A zu ihr übergehenden Wärmemenge nicht merklich geändert wird.

Fig. 106.



Wird der Kork D in das Brett E gesetzt, so hängt das Strahlungsgefäss in dem vor Luftströmungen relativ geschützten Raume G.

Zum Messen der Abkühlungszeiten dient ein Chronoskop.

Uebung 1. 1) Man bestimmt das Gewicht des leeren Strahlungsgefässes A : P_0 gr.

2) Das Gefäss A wird bis etwas unterhalb des Halses mit Wasser gefüllt: Gewicht P_1; Gewicht des Wassers $p_1 = P_1 - P_0$.

3) Das Thermometer C mit den beiden Korken B und D wird in das Gefäss A gesteckt. Dann wird das Gefäss A in ein Wasserbad bis zum Halse getaucht und C an einem Stative festgeklemmt.

4) Man erhitzt das Wasser in A bis etwa auf 85^0, nimmt das Gefäss A aus dem Wasserbade heraus, trocknet es ab und senkt es in den Raum G, indem man den Kork D in das Brett E einsetzt. Man wartet, bis das Thermometer bis auf etwa 80^0 gefallen ist und notirt dann von Minute zu Minute den Stand des Thermometers, bis das Thermometer etwa bis auf 60^0 gesunken ist.

5) Man nimmt A aus dem Raume G heraus, giesst das Wasser aus, trocknet mit Alkohol und Aether, füllt Terpentinöl in das Gefäss bis nahe zum Halse und wägt: Gewicht P_2 gr. Gewicht des Terpentinöles $p_2 = P_2 - P_0$.

6) und 7) Man verfährt mit dem mit Terpentinöl gefüllten Gefässe genau wie unter 3) und 4).

Mit den unter 4) und 7) erhaltenen Werthen construirt man eine Curve, welche den Gang der Abkühlung des strahlenden Körpers dar-

stellt, und zwar verzeichnet man die Minuten als Abscissen, vgl. S. 7, die Temperaturen als Ordinaten, indem man, um Platz zu sparen, die tiefste beobachtete Temperatur möglichst nahe an die Abscissenaxe legt. Man sieht an der Curve, dass die Abkühlung erst schneller, dann immer langsamer erfolgt.

Aus den beiden Curven für Wasser und Terpentinöl erkennt man, dass das Wasser sich viel langsamer als das Terpentinöl abkühlt, die Curve für das letztere fällt viel steiler ab. Schon hieraus ist zu schliessen, dass die Wärmecapacität des Wassers im gleichen Volumen eine grössere als diejenige des Terpentinöles ist.

Aus den Curven erhält man die Zeiten, welche die beiden Flüssigkeiten zu demselben Temperaturabfall brauchen. Man sucht die Punkte auf, in denen beide Curven dieselben zwei möglichst hoch und möglichst tief gelegenen Horizontallinien schneiden, etwa die 78 und 62° entsprechenden Horizontallinien. Dann sucht man die Zeiten, welche zu diesen Schnittpunkten gehören. Findet man für die beiden Schnittpunkte der Curve, welche dem Wasser zukommt, die Abscissen x_1 und x_2, so ist die Zeit der Abkühlung von 78 bis auf 62° $Z_1 = x_2 - x_1$. Analog erhält man für das Terpentinöl $Z_2 = x_4 - x_3$ und daraus c_2.

Beispiel: $P_0 = 24{,}1$ gr: also $w = 2{,}31$; $p_1 = 43{,}73$ gr; $p_2 = 38{,}31$ gr. Für den Temperaturabfall von 76 bis 41° ergab sich für Wasser $Z_1 = 30{,}8$ Minuten; für Terpentinöl $Z_2 = 15{,}5$ Minuten. Daraus folgt $c_2 = 0{,}54$.

Uebung 2. Das mit Terpentinöl gefüllte Gefäss A wird abermals bis über 80° erwärmt, dann aussen getrocknet und über einer Petroleumlampe angerusst. Man notirt während einiger Minuten die Temperaturen; der Temperaturabfall erfolgt sehr viel rascher.

Allgemeines. 1. Befindet sich ein erwärmter Körper in Luft, so verliert er seine Wärme nicht allein durch Strahlung, sondern auch durch Leitung und Convection. In Folge der Leitung geht einerseits ein Theil der Wärme durch die Unterstützungen, in unserem Falle das Thermometer, in die umgebenden Körper über, andererseits giebt der Körper Wärme an die einzelnen, zunächst ruhend gedachten Luftmassen ab. Diese werden dadurch leichter, steigen in die Höhe und machen anderen kälteren Luftmassen Platz, die wieder erwärmt werden, aufsteigen u. s. f. Man bezeichnet diese Art der Fortführung der Wärme als Convection.

Von den Einflüssen der Convection kann man sich bei Strahlungsversuchen nur dadurch frei machen, dass man den Strahlungsraum sehr weit evacuirt, dann bleibt aber immer noch eine Leitung selbst durch eine hochverdünnte Luftschicht bis zu der Wand des Gefässes.

Da die Convectionsströmungen um so lebhafter werden, je grösser die Temperaturdifferenzen sind, so unterstützen sich Strahlung und Convection bei der Abkühlung des Körpers. Bleibt man, wie es hier geschehen ist, zwischen denselben Temperaturgrenzen und sind auch sonst die Versuchsbedingungen analog, so gehen die Einflüsse der

Strahlung und Convection bis zu einem gewissen Grade einander parallel.

Wir haben daher in unserem Falle die Convectionsströmungen nicht besonders berücksichtigt.

2. Die Proportionalität zwischen Strahlung und Temperaturüberschuss findet in grösserer Annäherung nur statt, wenn der Temperaturüberschuss nicht allzu gross ist. Bei grösseren Temperaturdifferenzen hängt die Strahlung in anderer Weise von der Temperatur ab. Am besten stellt das Gesetz von Stefan die Strahlung dar, welches aussagt: „Die Strahlung wächst mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur, welche von — 273° C. an gerechnet ist.“ Bei dem hier zur Ermittelung der specifischen Wärmen benutzten Verfahren ist die Form des Strahlungsgesetzes ohne Einfluss, da die Temperatur aus der Endformel herausfällt.

3. Glatte und glänzende Oberflächen strahlen weniger, rauhe und dunkle Oberflächen strahlen stärker.

Dies ist bei der Construction des Apparates benutzt. Die Oberfläche des Strahlungsgefässes ist blank, damit die Ausstrahlung nicht zu rasch erfolgt, so dass sich die Temperatur im Inneren desselben möglichst vollkommen ausgleichen kann und das Thermometer wirklich die Temperatur der Flüssigkeit anzeigt. Die innere Fläche von G ist jedoch geschwärzt, damit sie die auf sie übergestrahlte Wärme möglichst vollkommen aufnimmt; dieselbe wird durch das Metall schnell dem Wasser zugeführt.

Um die Ausstrahlung und Einstrahlung von Wärme zu vermindern, macht man die Aussenseiten der Calorimeter blank. Will man einen Körper vor strahlender Wärme schützen, so umgiebt man ihn mit einem glänzenden (z. B. mit Stanniol beklebten) Schirm.

Allgemeines.

Bei den meisten festen Körpern ist die specifische Wärme nur wenig von der Temperatur abhängig, bei den Flüssigkeiten ändert sie sich meist stark mit derselben.

Feste Elemente gehorchen sehr angenähert dem Dulong-Petit'schen Gesetze: Die specifische Wärme ist nahezu umgekehrt proportional dem Atomgewicht, oder das Product aus specifischer Wärme und Atomgewicht, die Atomwärme, ist nahezu eine Constante. Ihr Werth liegt etwas oberhalb 6. Wir haben oben das Gesetz an Kupfer und Blei mit den sehr verschiedenen Atomgewichten Cu = 63 und Pb = 206,6 geprüft; wir fanden für Kupfer die Atomwärme = 6,0, für Blei = 6,3.

Ausnahmen von dem Dulong-Petit'schen Gesetze machen Kohlenstoff, Silicium und Bor; ihre specifische Wärme und damit auch ihre Atomwärme ist bei gewöhnlicher Temperatur wesentlich kleiner, als

das Gesetz verlangt. Für Graphit ist nach den obigen Messungen die Atomwärme zwischen 20 und 100° nur etwa = 3,0. Bei diesen drei Körpern wächst aber die specifische Wärme stark mit der Temperatur, so dass bei sehr hohen Temperaturen die Atomwärme die normale wird.

Das Dulong-Petit'sche Gesetz kann man benutzen, um eine Entscheidung darüber zu treffen, welchen Werth das Atomgewicht eines Elementes von den verschiedenen besitzt, die man aus der Analyse einer Verbindung desselben erhält, je nachdem man annimmt, dass das Element die eine oder die andere Werthigkeit besitzt. Man bestimmt dazu die specifische Wärme, dividirt mit ihr in 6 und nimmt denjenigen Werth der verschiedenen aus der Analyse abgeleiteten Atomgewichte, der dem so berechneten am nächsten liegt. Findet man z. B. für einen Körper die specifische Wärme 0,2, so ist das Atomgewicht ca. $A = 6/0,2 = 30$.

Für Verbindungen gilt das Gesetz: Analoge Verbindungen mit gleich viel Atomen haben gleiche Molecularwärmen, und die Molecularwärme einer Verbindung, die n Atome enthält, ist in sehr vielen Fällen sehr nahe gleich $n \cdot 6$. So wurde für Zinkblende (ZnS) die Molecularwärme zu 11,6, für Bleiglanz (PbS) zu 11,9 bestimmt. Auch dieses Gesetz kann man zur Bestimmung der Atomgewichte heranziehen.

Doch erfährt dieses Gesetz Ausnahmen, ebenso wie das von Dulong-Petit.

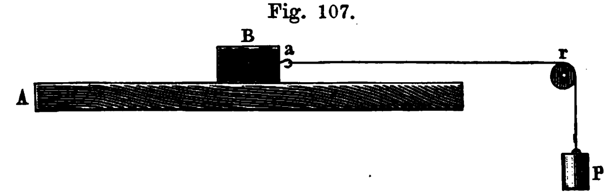
VIII. Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalentes.

Einleitung.

Gebraucht wird: Entweder Puluj'scher Apparat Fig. 109; Quecksilber; Thermometer; Gewichte; Waage; oder Apparat nach Christiansen (Fig. 110).

Durch Arbeit können wir Wärme erzeugen, so bei der Reibung, und umgekehrt durch Wärme Arbeit, so bei den Dampfmaschinen [1]).

Fig. 107.



In welcher Weise auch Arbeit in Wärme umgesetzt werden mag, stets ist die erzeugte Wärme der scheinbar verloren gegangenen, verbrauchten Arbeit proportional. Zur Erzeugung einer grossen Calorie ist eine Arbeit von 427 mkgr erforderlich. Umgekehrt können wir durch Zufuhr einer grossen Calorie eine Arbeit von 427 mkgr leisten.

$J = 427$ mkgr $= 4{,}2 \times 10^{10}$ Erg heisst das mechanische Wärmeäquivalent.

Durch eine kleine Calorie (bei 0^0) [2]) wird eine Arbeit von 427 mgr oder 427 mmkgr $= 4{,}2 \times 10^7$ Erg geleistet.

Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalentes.

Princip. Wir ziehen ein Brett A unter einem Brette B mit constanter Geschwindigkeit von rechts nach links fort (Fig. 107). An B ist an einer über eine Rolle r gehenden Schnur ein Gewicht P angehängt. Die Geschwindigkeit von A wird so regulirt, dass das Gewicht

---

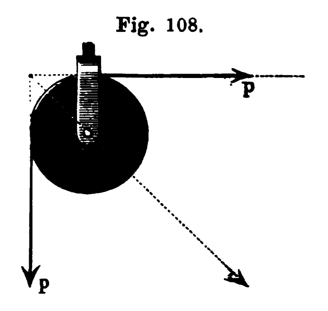
[1]) Ueber die Messung der Arbeit vergl. S. 34, über die Messung von Wärmemengen S. 175.

[2]) Der Wärmemenge, welche 1 gr Wasser bei Zimmertemperatur, also zwischen 16 und 20^0, um 1^0 erhöht, entsprechen ca. $4{,}183 \cdot 10^7$ Erg.

gerade in Ruhe bleibt, also weder steigt noch sinkt; seine Grösse, vermehrt um den Reibungswiderstand der Rolle r, hält dann gerade der Reibung zwischen A und B das Gleichgewicht. Diese, multiplicirt mit dem von einem Punkte der Fläche A zurückgelegten Wege, giebt die verbrauchte Arbeit. Messen wir die hier wie bei jeder Reibung frei werdende Wärmemenge, so können wir das mechanische Wärmeäquivalent berechnen.

Die Reibung an der Rollenaxe ist bestimmt durch den Druck, welchen dieselbe erleidet. Bei dem eben beschriebenen Versuche greifen in horizontaler und verticaler Richtung die Kräfte P, Fig. 108, an, jede derselben liefert senkrecht zur Rollenaxe einen Druck $P\cos 45 = P/\sqrt{2}$, also beide zusammen einen Druck $2P/\sqrt{2} = P\sqrt{2}$. Nachdem man das Gewicht P ermittelt hat, welches der Reibung das Gleichgewicht hält, löst man die Schnur bei a los, lässt sie frei über die Rolle hängen, befestigt an beiden Enden derselben Gewichte $\frac{1}{2}P\sqrt{2}$, die zusammen wieder auf die Rollenaxe einen Druck $P\sqrt{2}$ ausüben. Man bestimmt das Uebergewicht P', das man auf die eine Seite auflegen muss, um die Rolle gerade in Bewegung zu setzen. P' ist dann die Reibung an der Rollenaxe, $P + P' = \Pi$ ist die Reibung der Fläche A an der Fläche B.

Fig. 108.



Apparat nach Puluj. Auf der verticalen Axe einer Schwungmaschine ist, in geeigneter Weise vor Wärmeverlust durch Leitung geschützt, der stählerne Hohlkegel k conaxial befestigt (Fig. 109, a. f. S). Ein ganz gleicher Hohlkegel, welcher in den ersten lose hineingesteckt ist, trägt an seinem Deckel einen Hebelarm gh, dessen Ende h auf einem Kreisbogen zwischen zwei Stiften α_1 und α_2 spielt. Ein an diesem Ende befestigter, über eine Rolle r gelegter Faden trägt eine Schale S. Das Innere des zweiten Stahlkegels wird mit Quecksilber gefüllt und in dasselbe von oben ein Thermometer t gesteckt, welches den Deckel längs der Axe durchsetzt. An einem Zählwerk liest man die Zahl der Umdrehungen des äusseren Kegels ab.

Apparat nach Christiansen. Statt der beiden stählernen Hohlkegel verwendet man zweckmässiger den folgenden Apparat, der einer der von Joule benutzten Anordnungen nachgebildet ist. (Die Fig. 110 auf S. 193 giebt einen Längsschnitt in $\frac{1}{3}$ der natürlichen Grösse.) In einem Messingcylinder A, der auf der Axe X der Centrifugalmaschine befestigt werden kann und durch einen schlechten Wärmeleiter von ihr isolirt wird, sind in Abständen von je 90^0 vier messingene Flügelsysteme B angebracht. In der Mitte des Bodens von A ruht auf einer Spitze eine hohle, mit einer Reihe von Oeffnungen versehene messingene

Axe M, die durch den Deckel des Messingcylinders mit geringer Reibung hindurchgeht. An diese Axe M sind in Abständen von je 45° acht Flügelsysteme F angelöthet. Rotirt das äussere Gefäss, so gehen die vorspringenden Theile der Flügel B an demselben mit wenig Spielraum durch die einspringenden Theile der Flügel F an der Axe M hindurch. An dem oberen Ende von M ist der Hebel h, wie bei dem Puluj'schen Apparat angebracht[1]). In die Höhlung der Axe M wird das Thermometer gesteckt.

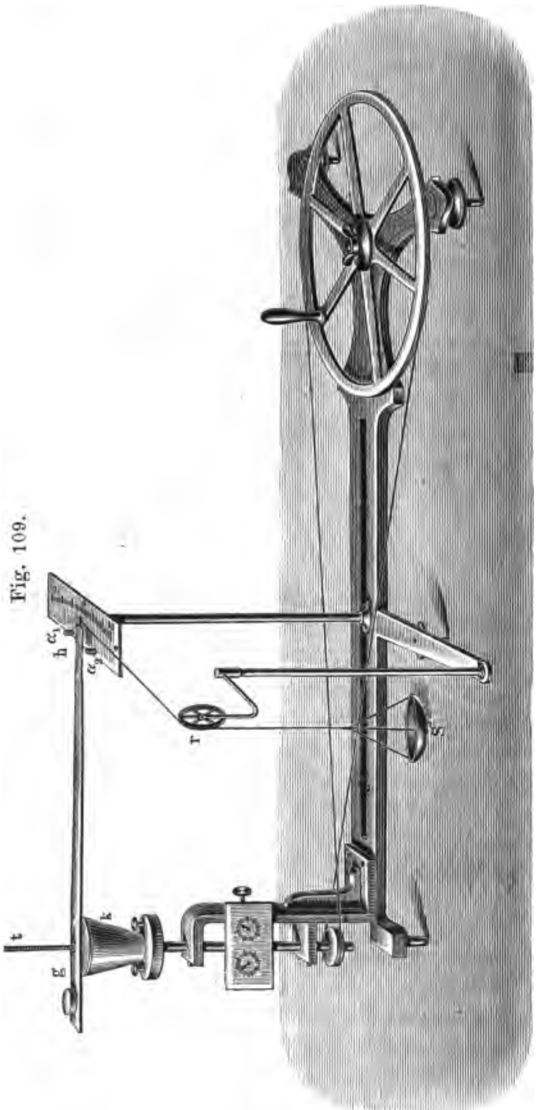


Fig. 109.

Uebung mit dem Apparat von Christiansen. 1) Man wägt die Schale S.

2) Man wägt die Messingtheile; ihr Gewicht sei M.

3) Man füllt den Apparat mit einer abgemessenen Menge Wasser. Gewicht q.

4) Man setzt den Apparat zusammen, legt in die Schale S ein Gewicht P_1. Das Gewicht von Schale und Gewicht sei $P_1 + S = P$.

5) Man übt sich ein, so schnell zu drehen, dass das Ende des Hebels in Ruhe bleibt resp. zwischen α_1 und α_2 spielt.

[1]) Verwendet man den Apparat von Puluj, so hat man entsprechende Wägungen auszuführen. Statt des Wassers kann man auch Terpentinöl verwenden; da dessen specifische Wärme klein ist, steigt die Temperatur schneller; man muss die specifische Wärme desselben besonders bestimmen.

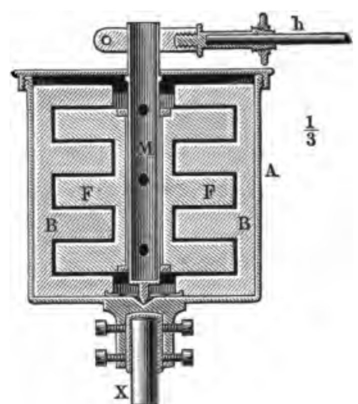
6) Man liest die Temperatur ϑ_1 ab, nimmt den Zeiger etc. ab und dreht ca. 200 mal mit derselben Geschwindigkeit wie bei 5).

7) Man liest die Temperatur ϑ_2 ab.

8) Man setzt den Apparat zusammen und liest die Temperatur ab: t_1.

9) Man dreht stetig so, dass das Ende des Hebelarmes in Ruhe bleibt, resp. zwischen α_1 und α_2 spielt, bis die Temperatur um ca. 4^0 gestiegen ist. Man liest die Temperatur ab: t_2.

Fig. 110.



10) Man liest die Zahl der Umdrehungen ab: n.

11) Man entfernt wieder den Hebel, liest die Temperatur ab: ϑ'_1, macht 200 Umdrehungen, liest wieder die Temperatur ab: ϑ'_2.

12) Man misst die Länge des Hebelarmes l.

13) Man bestimmt die Reibung der Rolle in der oben angegebenen Weise; sie sei P'.

Die Messungen 6), 7) und 11) dienen dazu, die Correction für Strahlung und Leitung zu ermitteln.

Berechnung. Zur Berechnung der an dem Puluj'schen Apparate verbrauchten Arbeit nehmen wir der Einfachheit wegen zunächst an, dass die sich reibenden Flächen Cylinder mit dem Radius r sind; der an dem Hebelarm r wirkenden Reibung wird durch eine Kraft $P + P'$ im Abstande l das Gleichgewicht gehalten, die Reibung ist also:

$$(P + P') \,.\, l/r.$$

Da bei einer Umdrehung sich die Angriffspunkte der Reibung an den einzelnen Stellen der Oberfläche um $2\pi r$ fortbewegen, so ist die bei einer Umdrehung verbrauchte Arbeit

$$A_1 = 2\pi r (P + P') \,.\, l/r = 2\pi (P + P') l,$$

und bei n Umdrehungen:

$$A_n = 2 n \pi (P + P') l.$$

Dasselbe Resultat erhält man für beliebige reibende Flächen, denn aus der Endformel fällt r heraus.

Zur Bestimmung der erzeugten Wärmemenge müssen wir den Wasserwerth des Apparates kennen.

Bei dem Christiansen'schen Apparat ist W[1]), wenn $\gamma = 0{,}094$

[1]) Bei dem Puluj'schen Apparat ergiebt sich ein analoger Werth, wenn p das Gewicht des Quecksilbers im Stahlcylinder ist:

$$W = 0{,}1138\, M + p \,.\, 0{,}0333 + w.$$

die specifische Wärme des Messings und M das Gewicht der Messingtheile ist:

$$W = 0{,}094\,M + q + w.$$

Die direct beobachtete Temperaturerhöhung $T = t_2 - t_1$ ist für Strahlung und Leitung zu corrigiren.

Die Correction $\varDelta$ ist für die n Umdrehungen:

$$\varDelta = \frac{n}{200} \cdot {}^1\!/_2\,(\vartheta_2 - \vartheta_1 + \vartheta'_2 - \vartheta'_1).$$

Die erzeugte Wärmemenge ist $Q = W\,.\,(T + \varDelta)$.

Ist J das mechanische Wärmeäquivalent, so wird $J\,.\,Q = A_n$:

$$J\,.\,W\,.\,(T + \varDelta) = 2\,n\pi\,(P + P')\,.\,l$$

$$J = \frac{2\,n\pi\,(P + P')\,l}{W\,.\,(T + \varDelta)}.$$

Beispiel: Mit dem Christiansen'schen Apparat $P_1 = 50$ gr. $S = 10{,}5$, also $P = 60{,}5$ gr. $M = 891$ gr. $q = 400$ gr. $t_1 = 19{,}05^0$. $t_2 = 21{,}35^0$. $n = 5154$. $l = 25$ cm. $P' = 1{,}5$ gr. $w = 0{,}35$. $W = 484{,}1$. $T = 2{,}3^0$. $\varDelta = 0{,}03^0$. $J = 44\,470$ cm.gr $= 444{,}7$ m.gr.

IX. Specifische Wärme der Gase.

Gebraucht wird: Apparat nach Clement und Desormes; Drechsel'sche Flasche mit Schwefelsäure; Schwefelsäuremanometer; Kundt'sche Röhre, Fig. 81; Kipp'scher Apparat für Kohlensäure und Wasserstoff.

Definitionen. Bei den Gasen hat man zu unterscheiden:

a) Specifische Wärme bei constantem Drucke c_p, d. i. diejenige Wärmemenge, welche man der Gewichtseinheit eines Gases zuführen muss, um dieselbe um einen Grad zu erwärmen, wenn der Druck des Gases unverändert bleibt, das Gas sich also ausdehnt.

b) Specifische Wärme bei constantem Volumen c_v, d. i. diejenige Wärmemenge, welche man der Gewichtseinheit eines Gases zuführen muss, um dasselbe um einen Grad zu erwärmen, wenn sich dabei nicht das Volumen, wohl aber der Druck ändert.

Die Bestimmung der specifischen Wärme c_p bei constantem Druck lässt sich z. B. nach der Mischungsmethode in folgender Weise durchführen. Gemessene Volumina des Gases werden aus einem Gasometer durch ein in einem erwärmten Bade befindliches Rohr geleitet, und dadurch auf eine bestimmte Temperatur erhitzt, und dann durch ein zweites, in einem Calorimeter liegendes Röhrensystem geführt, wo sie ihre Wärme abgeben. Unter Berücksichtigung der vom Erwärmungsapparate durch Leitung an das Calorimeter übergegangenen Wärme, der Wärmeabgabe des Calorimeters nach aussen u. s. f., berechnet man die specifische Wärme für das Gas ganz ähnlich wie für feste und flüssige Körper bei der Mischungsmethode.

Statt die specifische Wärme c_v bei constantem Volumen direct zu bestimmen, misst man das Verhältniss $k = c_p/c_v$ der beiden specifischen Wärmen und berechnet daraus und aus $c_p : c_v = c_p/k$.

1. Bestimmung des Verhältnisses der beiden specifischen Wärmen nach Clement und Desormes.

Princip. Man comprimirt in einem Gefässe eine gewisse Menge Gas und lässt dasselbe die Temperatur t der Umgebung annehmen; dann öffnet man für einen Augenblick das Gefäss, so dass der Druck der Atmosphäre und des Gases sich völlig ausgleicht. Dabei dehnt sich das Gas aus und kühlt sich ab, da es eine Arbeit leistet, denn es

drängt bei seiner Ausdehnung die umgebende Luft zurück. Man schliesst das Gefäss wieder und lässt das Gas sich bis auf die Umgebungstemperatur erwärmen, dabei steigt der Druck.

Ist h der Druck des comprimirten Gases von der Temperatur t, h' der des Gases nach der Ausdehnung, wenn es wieder die Temperatur t angenommen hat, so ist angenähert:

$$k = c_p/c_v = h/(h - h').$$

Apparat. In die drei Tubuli einer grossen, wenigstens 10 Liter fassenden Glasflasche (Schwefelsäureballon in Strohkorb) sind luftdicht eingesetzt: 1) ein weit durchbohrter Hahn H_1; 2) ein zu einem Schwefelsäuremanometer führendes Rohr; 3) ein Hahn H_2, der unter Zwischenschaltung einer mit Schwefelsäure gefüllten Drechsel'schen Trockenflasche mit der Luft communicirt.

Uebung. 1) Man schliesst H_1, öffnet H_2, presst durch die Drechsel'sche Flasche trockene Luft in die grosse Flasche und schliesst H_2.

2) Man wartet, bis das Manometer einen constanten Druck anzeigt und liest die Stellung der oberen und unteren Kuppe der Flüssigkeitssäule in dem Schwefelsäuremanometer ab: h_o und h_u.

3) Man öffnet und schliesst rasch den Hahn H_1.

4) Das Manometer sinkt erst und steigt dann nach dem Schliessen erst schnell, dann langsamer; sowie seine Stellung constant geworden ist, liest man ab: h'_o und h'_u.

Dann sind, wenn d die Dichte der Schwefelsäure ist, die auf Wasser bezogenen Drucke:

$$h = (h_o - h_u) . d \qquad h' = (h'_o - h'_u) . d$$

$$k = \frac{h_o - h_u}{(h_o - h_u) - (h'_o - h'_u)}.$$

Beispiel. $h_o = 508$, $h_u = 41$ mm, $h = 467$. $h'_o = 326$, $h'_u = 225$, $h' = 101$. $k = 467/366 = 1,29$. Wenn man alle Wärmeverluste vermeiden könnte, würde man etwa 1,41 erhalten. Dies ist in um so höherem Maasse möglich, je grösser der das Gas enthaltende Raum ist; man hat mit sehr grossen Gefässen in der That $k = 1,41$ gefunden.

2. Bestimmung des Verhältnisses der specifischen Wärmen durch die Schallgeschwindigkeit.

Princip. Ist u die Schallgeschwindigkeit in einem Gase, p der Druck des Gases, d seine Dichte und g die Beschleunigung durch die Schwere, so ist

$$u = \sqrt{\frac{gp}{d} k}.$$

Bestimmt man u für ein Gas in cm/sec. (etwa mit Hülfe der Kundt'schen Röhren, S. 131), kennt man ferner d und g (= 981 cm/sec.^{2}), so kann man k berechnen:

$$k = u^2 d/gp.$$

Beziehen sich die Grössen $u' p' d' k'$ auf ein anderes Gas, so ist:

$$u' = \sqrt{\frac{g p'}{d'} k'}.$$

Untersucht man beide Gase bei demselben Drucke ($p = p'$), so ist:

$$\frac{u}{u'} = \sqrt{\frac{d' k}{d k'}}. \qquad k' = k \frac{d'}{d} \frac{u'^2}{u^2}.$$

Nun ist $u = z \cdot 2\,l$ (vergl. S. 131), wenn z die Schwingungszahl eines Tones, l der Abstand zweier Knoten in einer mit dem Gase gefüllten Kundt'schen Röhre ist; also

$$\frac{l}{l'} = \frac{u}{u'} \quad \text{oder} \quad k' = k \frac{d' l'^2}{d l^2}.$$

Für Luft ist $k = 1{,}41$, man kann also k' für irgend ein Gas mit Hülfe der Staubfiguren in einer Kundt'schen Röhre bestimmen.

Uebung. 1) Man bestimmt in der auf S. 131 angegebenen Weise mit Hülfe der Kundt'schen Röhre l und l' für Luft und Kohlensäure.

2) Man berechnet k' für Kohlensäure, dabei ist $d' : d = 1{,}53$.

Beispiel: $l' = 4{,}528$, $l = 5{,}948$; danach ist $k' = 1{,}25$.

Ist nach den besprochenen Methoden das Verhältniss c_p/c_v der specifischen Wärmen bei constantem Druck und constantem Volumen und die specifische Wärme bei constantem Druck c_p ermittelt, so ergiebt sich daraus auch diejenige c_v bei constantem Volumen.

Für Luft ist z. B. $c_p = 0{,}237$, $c_p/c_v = 1{,}41$; also $c_v = 0{,}168$.

Allgemeines.

1. Bei den unter 1) ausgeführten Bestimmungen ist vorausgesetzt, dass der Ausgleich der inneren und äusseren Drucke so schnell vor sich geht, dass weder Wärme von aussen dem Gase zugeführt, noch von diesem nach aussen abgegeben wird. Man nennt eine derartige Zustandsänderung eine adiabatische.

2. Erwärmen wir ein Gas bei constantem Volumen, so dient die zugeführte Wärmemenge nur dazu, die Energie der Molecularbewegung entsprechend der Temperatursteigerung zu vergrössern; erwärmen wir das Gas bei constantem Drucke, wobei es sich ausdehnt, so muss noch eine äussere Arbeit a geleistet werden, da der Angriffspunkt des Atmosphärendruckes zurückgeschoben werden muss; der Unterschied der beiden specifischen Wärmen $c_p - c_v$ ist die Wärmemenge, welche der Arbeit a entspricht, welche 1 gr eines Gases bei der Ausdehnung durch die Erwärmung um 1^0 leistet. Ist J das mechanische Wärmeäquivalent, d. h. die Arbeit (vergl. S. 190) in Metergrammen, welche einer kleinen Calorie entspricht, so ist:

$$J(c_p - c_v) = a.$$

Die Grösse a berechnet sich folgendermaassen (vgl. auch die Ausführungen S. 208): Ein Liter Luft wiegt 1,293 gr; ein Gramm Luft nimmt also ein Volumen von 1/1,293 cbdm ein; einen Cylinder von 1 qdcm Basis erfüllt es also bis auf eine Höhe von 1/1,293 dm. In dieser Höhe sei der Cylinder durch einen gewichtslosen Stempel abgeschlossen, auf dem der Atmosphärendruck mit dem Gewichte von 7,6 Liter Quecksilber = 7,6 . 1000 . 13,6 = 103 360 gr lastet. Beim Erwärmen um 1° dehnt sich die Luft um 1/273 ihres Volumens bei 0° aus, der Stempel wird also um $^1/_{1,293} \cdot {}^1/_{273}$ dm = 0,0002832 m gehoben. Dabei wird eine Arbeit geleistet von $a = 103\,360 \cdot 0{,}0002832 = 29{,}28$ Metergrammen. Andererseits ist: $c_p - c_v = 0{,}237 - 0{,}168 = 0{,}069$, also $J = 29{,}28/0{,}069 = 424{,}4$ Metergrammen. Einer kleinen Calorie entspräche also eine Arbeit von 424,4 Metergrammen, genauer von 427 Metergrammen (vgl. S. 190), einer grossen Calorie eine solche von 427 Meterkilogrammen. Auf diese Weise hat **Robert Mayer** (1842) zuerst das mechanische Wärmeäquivalent aus den damals freilich noch unvollkommen bestimmten Daten berechnet.

3. Die Molecüle der Gase besitzen einerseits eine translatorische Bewegung ihrer Schwerpunkte, andererseits eine rotatorische und oscillatorische Bewegung ihrer einzelnen Atome. Aus dem Verhältnisse der beiden specifischen Wärmen c_p/c_v ergiebt sich nach **Clausius** das Verhältniss der Energie der translatorischen Bewegung V_u zu der gesammten Energie V:

$$\frac{V_u}{V} = \frac{3}{2}\left(\frac{c_p}{c_v} - 1\right).$$

Ist die gesammte Energie der Molecüle eine translatorische, rotiren und oscilliren dieselben also nicht, oder ist die Energie der oscillatorischen Energie gegenüber derjenigen der translatorischen verschwindend klein, wie dies bei den Molecülen der einatomigen Gase der Fall ist, so ist:

$$V_u = V, \quad \text{also} \quad V_u/V = 1 \quad \text{und} \quad c_p/c_v = 1{,}66.$$

Kundt und **Warburg** haben in der That $c_p/c_v = 1{,}66$ bei dem einatomigen Quecksilberdampf gefunden.

Sind die Molecüle der Gase aus mehreren Atomen zusammengesetzt, so ist stets neben der translatorischen Energie rotatorische und oscillatorische in beträchtlichem Maasse vorhanden, es ist $V_u < V$, $V_u/V < 1$ und $c_p/c_v < 1{,}66$. Bei Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff ist $c_p/c_v = 1{,}41$, $V_u/V = 0{,}62$. Je complicirter die Molecüle sind, je mehr Atome dieselben enthalten, um so kleiner ist im Allgemeinen c_p/c_v, ein um so grösserer Bruchtheil der Gasammtenergie kommt auf die rotatorische und oscillatorische Energie; so ist für CO_2 $c_p/c_v = 1{,}29$, $V_u/V = 0{,}43$.

X. Schmelzwärme und Lösungswärme.

1. Schmelzwärme.

Gebraucht wird: Korbrührer (Fig. 111); Calorimeter; Wassermantel (Fig. 105); Eis in einer grösseren Reibschale; gröbere Waage mit Gewichten.

Princip. Bei dem Uebergange eines Grammes eines Körpers aus dem festen in den flüssigen Aggregatzustand (vergl. S. 147) bei dem Schmelzpunkte T wird eine Wärmemenge verbraucht; sie kommt nicht in einer Erhöhung der Temperatur zum Ausdruck, sie wird latent und heisst daher die latente Schmelzwärme L. Die Schmelzwärme ist gleich der Erstarrungswärme, welche beim Erstarren frei wird.

Die moleculare Schmelzwärme ist diejenige, welche beim Schmelzen des Moleculargewichtes (S. 6) verbraucht wird.

a) Bestimmung der Schmelzwärme. Man kühlt ein Gewicht P des untersuchten Körpers auf eine unter der Schmelztemperatur T gelegene Temperatur T_1 ab und bringt ihn in ein Calorimeter, dessen Anfangstemperatur t_0 ist, die über der Schmelztemperatur liegt, und welches eine solche Menge Flüssigkeit enthält, dass bei dem Schmelzen des Körpers die Temperatur nicht bis zu der Schmelztemperatur sinkt Ist die Endtemperatur des Calorimeters t und ist c_1 die specifische Wärme der flüssigen Substanz, c die der festen, w_1 der Wasserwerth des Gefässes, in dem sich der zu untersuchende Körper befindet, w der des Calorimeters, W das Gewicht der Flüssigkeit in demselben, c_0 ihre specifische Wärme, so ist, falls wir die Strahlung etc. vernachlässigen:

$$(Wc_0 + w)(t_0 - t) = w_1(t - T_1) + P\{c(T - T_1) + L + c_1(t - T)\},$$

und:

$$L = \frac{(Wc_0 + w)(t_0 - t) - w_1(t - T_1) - P\{c(T - T_1) + c_1(t - T)\}}{P}.$$

Dem Einflusse der Strahlung wird durch Correction der Endtemperatur t in der S. 181 angegebenen Weise Rechnung getragen.

Die Endtemperatur t darf nicht tief unter derjenigen der Umgebung liegen, da sich sonst auf dem Calorimeter Wasserdampf niederschlägt, wodurch demselben beträchtliche Wärmemengen zugeführt werden.

b) Bestimmung der Erstarrungswärme. Man erhitzt den Körper bis zu der Temperatur T_1', welche über der Schmelztemperatur T

liegt, bringt ihn in ein Calorimeter, dessen Temperatur unter T liegt, und lässt ihn in demselben erstarren. Dann ist:

$$(Wc_0 + w)(t - t_0) = w_1 (T_1 - t) + P\{c_1 (T_1' - T) + L + c(T - t)\},$$

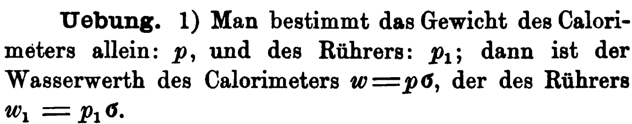
und

$$L = \frac{(Wc_0 + w)(t - t_0) - w_1 (T_1 - t) - P\{c_1 (T_1' - T) + c(T - t)\}}{P}.$$

1. Latente Schmelzwärme des Eises.

Apparat. Zur Aufnahme des zerkleinerten Eises dient ein Korbrührer, Fig. 111. Der aus Messinggaze gefertigte, 4 cm hohe, $3^1/_2$ cm weite Korb ist oben durch einen Deckel a aus Drahtgaze verschliessbar. An einer Seite ist der Korb etwas eingebogen, so dass das Thermometer neben ihm im Calorimeter Platz hat. Der Korb ist an einen 20 cm langen Messingdraht gelöthet und dient gleichzeitig als Rührer. Das Calorimeter ist ein 9 cm hoher, 5 cm weiter Cylinder aus vernickeltem Messingblech (Wassermantel, wie Fig. 105).

Fig. 111.



Uebung. 1) Man bestimmt das Gewicht des Calorimeters allein: p, und des Rührers: p_1; dann ist der Wasserwerth des Calorimeters $w = p\sigma$, der des Rührers $w_1 = p_1\sigma$.

2) Gewicht des etwa zur Hälfte mit Wasser gefüllten Calorimeters p'.

3) Gewicht des Wassers $W = p' - p$.

4) Der Rührer wird mit so viel abgetrockneten Eisstücken gefüllt, dass die Temperatur des Calorimeters nicht zu tief sinkt (1 gr Eis erniedrigt, da seine Schmelzwärme ca. 80 cal. ist, beim Schmelzen die Temperatur von etwa 80 gr Wasser um 1°). Die Temperatur des Calorimeters wird durch Erwärmen etwas erhöht; sie sei t_0.

5) Der Rührer wird in das Calorimeter geführt; unter beständigem Rühren schmilzt das Eis, dessen Temperatur im Momente des Hineinbringens $T_1 = T = 0°$ ist: die Temperatur sinkt. Sowie Stillstand eintritt, liest man ab: Endtemperatur t.

6) Man wägt das Calorimeter mit Rührer, Wasser und geschmolzenem Eis, Gewicht p'', dann ist das Gewicht des Eises $P = p'' - p_1 - p'$.

Da für Wasser $c_0 = c_1 = 1$ ist, so ist:

$$L = \{(W + w)(t_0 - t) - w_1 t - Pt\}/P.$$

Beispiel: $p = 12{,}7$; $w = 1{,}0$; $p_1 = 23{,}2$; $w_1 = 2{,}0$; $p' = 218{,}9$; $W = 206{,}2$ gr; $t_0 = 16{,}4$; $t = 12{,}7$; $p'' = 250{,}2$; $P = 8{,}1$ gr; $L = 78{,}8$.

2. Latente Schmelzwärme des Benzols.

Apparat. Andere Substanzen als Eis bringt man in dünnwandige Glaskölbchen (vgl. specifische Wärme der Flüssigkeiten S. 183), erhitzt

dieselben bei der Bestimmung der latenten Erstarrungswärme bis zum Schmelzen der Substanz und taucht sie dann in das Calorimeter. Sollte die geschmolzene Substanz in Folge von Ueberschmelzung (S. 148) nicht im Calorimeter erstarren, so wirft man ein Körnchen derselben im festen Zustande hinein. Um die Substanzen zur Bestimmung der Schmelzwärme in den festen Zustand überzuführen, setzt man die mit ihnen gefüllten Glaskölbchen in ein Glas mit Alkohol, das sich in Eis oder in einer Kältemischung befindet. In den Alkohol taucht ein Thermometer.

Uebung. 1) Ein mit Benzol gefülltes, zugeschmolzenes Glaskölbchen (Wasserwerth w_1), welches eine Benzolmenge vom Gewicht P enthält, wird in einer Eiswassermischung bis auf 0^0 abgekühlt und dadurch das Benzol zum Erstarren gebracht (Erstarrungstemperatur $T = 4{,}4^0$).

2) Man bringt das schnell getrocknete Gefäss in das Calorimeter und verfährt wie oben.

Hier ist $c_0 = 1$; $T_1 = 0$; $T = 4{,}4$; $c = 0{,}5$; $c_1 = 0{,}42$ und

$$L = \{(W + w)(t_0 - t) - w_1 t - P[cT + c_1(t - T)]\}/P.$$

Beispiel: $P = 5{,}795$ gr; $w_1 = 0{,}36$; $t_0 = 16{,}4$; $t = 14{,}4$; $W + w = 103{,}3$ gr; $L = 28{,}4$.

2. Lösungswärme.

Gebraucht wird: Korbrührer (Fig. 111), Calorimeter, Wassermantel (Fig. 105); ein feineres Thermometer; Waage; Kochsalz (specifische Wärme einer 20 proc. Lösung = 0,861; Aenderung pro Procent — 0,005); Salmiak (specifische Wärme einer 15 proc. Lösung = 0,890; Aenderung pro Procent — 0,005).

Lösungswärme ist diejenige Wärmemenge, welche verbraucht oder entwickelt wird, wenn die Gewichtseinheit irgend eines Körpers in eine Lösung von bestimmter Concentration übergeführt wird. Die „moleculare Lösungswärme“ ist diejenige Wärmemenge, welche verbraucht oder entwickelt wird, wenn das Moleculargewicht des Körpers in Grammen (vergl. S. 6) gelöst wird.

Wir betrachten zunächst nur die Fälle, wo bei dem Lösungsprocesse keine Hydratbildung anzunehmen ist.

Princip. Man löst eine abgewogene Menge des Körpers in einer abgewogenen Menge des in einem Calorimeter mit Thermometer enthaltenen Lösungsmittels von gleicher Temperatur wie der Körper und beobachtet die eintretende Aenderung der Temperatur. Aus derselben ergiebt sich die Anzahl der verbrauchten oder entwickelten Calorien; die specifische Wärme der entstandenen Lösung wird dabei als bekannt angesehen; statt ihrer kann man bei sehr verdünnten Lösungen die specifische Wärme des Lösungsmittels benutzen.

Ist q die Lösungswärme, p das Gewicht der gelösten Substanz, P das Gewicht des Lösungsmittels, also $P + p$ das Gewicht der resultirenden Lösung, c deren specifische Wärme, w der Wasserwerth von

Calorimeter und Thermometer zusammen, t_0 die Anfangstemperatur, t die Endtemperatur, so ist $[(P + p)\, c + w]\, (t - t_0)$ die erzeugte (wenn dieser Ausdruck positiv), resp. die verbrauchte Wärmemenge (wenn er negativ ist), also die Lösungswärme:

$$q = \{[(P + p)\, c + w]\, (t - t_0)]\}/p$$

und die moleculare Lösungswärme:

$$Q = M\, \{[(P + p)\, c + w]\, (t - t_0)\}/p.$$

Apparat. Wie bei Bestimmung der Schmelzwärme des Eises.

Uebung. 1) Man wägt das Calorimeter mit dem korbförmigen Rührer; Gewicht p'; Wasserwerth: $w' = p' \sigma$.

2) Man wägt den Rührer; Gewicht p_1.

3) Man bringt in das Calorimetergefäss eine bestimmte Quantität Wasser P, z. B. 100 gr.

4) Man stellt das Calorimeter in den Calorimetermantel, senkt das Thermometer ein und deckt das Ganze zu.

5) Während das Calorimeter die Temperatur seiner Umgebung annimmt, schüttet man eine gewisse Salzmenge locker in den Korbrührer; Gewicht des Rührers mit Salz p_2, also Gewicht des Salzes: $p = p_2 - p_1$.

6) Man stellt den gefüllten Rührer eine Zeit lang neben das Calorimeter in den Wassermantel, damit er die gleiche Temperatur wie dieses annimmt. Man liest die Temperatur ab: t_0.

7) Man senkt den Rührer in das Calorimeter ein; unter fortwährendem Rühren beobachtet man den Gang des Thermometers. Sowie sich alles Salz gelöst hat, bleibt die Temperatur eine Zeit constant: Endtemperatur t [1]) (vergl. hierzu S. 181).

Bemerkung. Bei hygroskopischen Salzen berechnet man die gelöste Salzmenge erst nach der Lösung aus der Gewichtszunahme des Calorimeters.

Beispiel. Salmiak in Wasser gelöst: $p' = 39{,}2$ gr (Messing), $w' = 3{,}53$; $p_1 = 25{,}38$, $P = 100{,}00$; $p_2 = 39{,}39$, $p = 14{,}01$ gr; $t_0 = 15{,}70^0$; $t = 6{,}10$. Aus den oben (S. 201) gegebenen Zahlenwerthen ergiebt sich die specifische Wärme der entstandenen 14 proc. Lösung zu 0,895. Der Wasserwerth δ des Thermometers war 0,35. Demnach ist der Gesammtwasserwerth des Calorimeters $w = 3{,}88$. Man erhält daher für die Lösungswärme $q = -\ 72{,}6$ cal. Da $M = 53{,}5$ ist, so ist die moleculare Lösungswärme $Q = qM = -\ 72{,}6 \times 53{,}5 = -3884$ Cal. oder $-3{,}9$ Cal. Bei Kochsalz ergab sich $Q = -1{,}2$ Cal.

Allgemeines. Die Lösungswärme eines festen Körpers setzt sich aus mehreren Theilen zusammen. Statt nämlich den Körper direct zu lösen, können wir uns vorstellen: 1) derselbe wurde geschmolzen, dann werden 2) seine Molecüle auf so grosse Abstände gebracht, wie sie zwischen

---

1) Bei leicht löslichen Salzen geht der Process so rasch vor sich, dass eine Correction der Endtemperatur wegen Strahlung kaum nöthig ist.

ihnen in der Lösung vorhanden sind, darauf werde 3) das Lösungsmittel auf das grössere oder kleinere Volumen gebracht, welches es in der Lösung einnimmt; 4) werde der Körper in dem Zustande 2) mit dem Lösungsmittel im Zustande 3) gemischt. Eventuell sind noch Dissociations- und Ionitationswärmen zu beachten.

Die erste Wärmemenge entspricht der Schmelzwärme, die zweite bei sehr verdünnten Lösungen, bei denen die Abstände der Molecüle gross sind, der Verdampfungswärme, die dritte ist die Ausdehnungswärme des Lösungsmittels, die vierte stellt die bei der Verbindung von gelöstem und lösendem Körper frei werdende Wärmemenge dar. Beim Mischen einer Flüssigkeit mit einer anderen fällt die Schmelzwärme fort. Von allen diesen thermischen Processen wissen wir nur sehr wenig, woraus sich erklärt, dass noch keine einfachen Beziehungen zwischen den Lösungswärmen der verschiedenen Körper gefunden wurden.

XI. Verdampfungswärme.

Gebraucht wird: Calorimeter mit Rührer (Fig. 112); Thermometer; Kolben mit Dreifuss, Drahtnetz und einem Bunsenbrenner, einem Verbindungsrohr, Gestell mit Schirm und Tischchen; grössere Waage mit grösserem Gewichtssatze; Spritzflasche mit Wasser; Aethylalkohol.

Einleitung. Um die Gewichtseinheit einer Flüssigkeit bei ihrer Siedetemperatur in Dampf zu verwandeln, muss man ihr eine bestimmte Wärmemenge zuführen: die latente Verdampfungswärme; dieselbe hängt in hohem Grade von der Temperatur und dem Druck ab, bei denen die Verdampfung stattfindet. Der entstandene Dampf hat die gleiche Temperatur wie die verdampfende Flüssigkeit; bei fortgesetzter Wärmezufuhr tritt also keine Temperatursteigerung der Flüssigkeit ein, ehe dieselbe nicht vollkommen verdampft ist. Moleculare Verdampfungswärme ist diejenige Wärmemenge, welche man braucht, um das in Grammen ausgedrückte Moleculargewicht (vergl. S. 6) des Körpers zu verdampfen.

Princip. Wir führen p gr Flüssigkeit von der Temperatur t dadurch in den Dampfzustand über, dass wir sie zunächst auf ihre Siedetemperatur T erhitzen; dazu brauchen wir die Wärmemenge $pc(T-t)$, wo c die mittlere specifische Wärme der Flüssigkeit zwischen den Temperaturen T und t ist. Dann verwandeln wir sie in Dampf von der Temperatur T durch weitere Wärmezufuhr. Ist L die latente Dampfwärme, so brauchen wir zur Verdampfung der p gr pL cal. Im Ganzen müssen wir also

$$pc(T-t)+pL \text{ cal.}$$

zuführen. Die gleiche Wärmemenge wird abgegeben, wenn sich p gr Dampf condensiren und die gebildete Flüssigkeit sich auf t^0 abkühlt. Leiten wir daher die Dampfmenge p in ein Calorimeter von dem Wasserwerthe w, in welchem sich die Wassermenge W befindet und dessen Anfangstemperatur t_0 ist, und finden wir eine Temperaturerhöhung bis auf t, so ist t die Endtemperatur der sich aus dem Dampf bildenden Flüssigkeit und es ist:

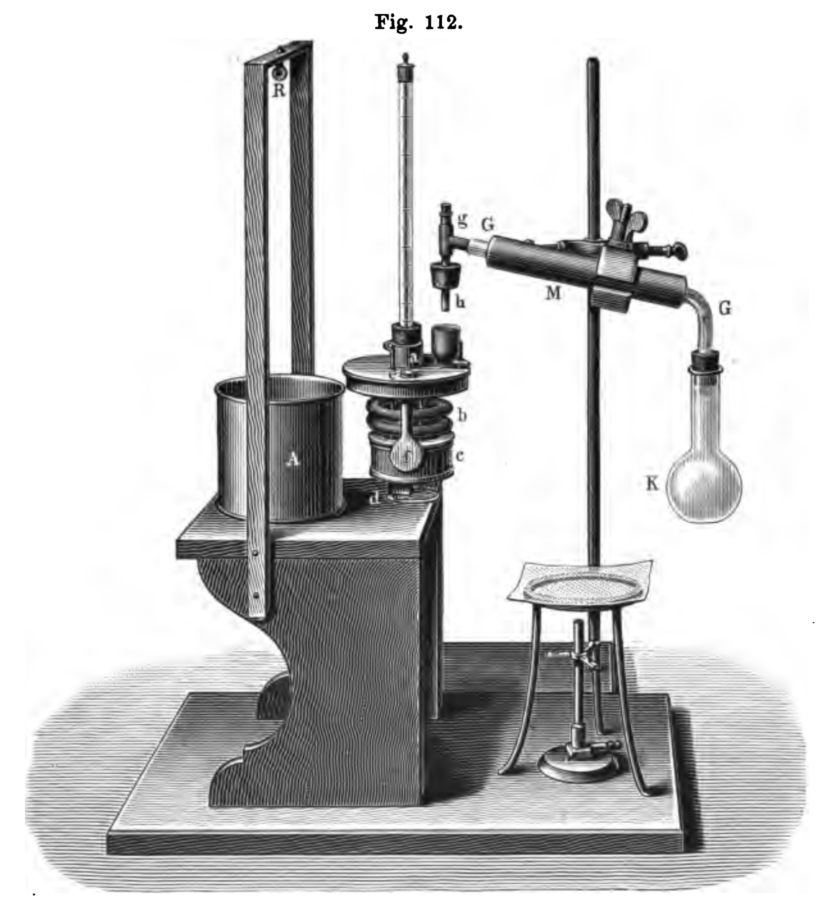
$$(W+w)(t-t_0)=p[c(T-t)+L].$$

Dem Wärmeverlust durch Strahlung während des Versuches muss Rechnung getragen werden. Entspricht derselbe einer Temperaturerniedrigung δ, so ist die latente Dampfwärme L:

$$L = \frac{(W + w)(t - t_0 + \delta) - pc(T - t)}{p}.$$

Apparat. Das Calorimeter A, Fig. 112 (nach Schiff), besteht aus einem ca. 10 cm weiten, cylindrischen Messinggefäss, dessen Deckel

Fig. 112.



fünffach durchbohrt ist. Die mittlere, mit einem kurzen Halse versehene Oeffnung a dient zur Aufnahme des Thermometers, in einer seitlichen Oeffnung mündet das Schlangenrohr b, welches in einem ringförmigen Kasten c endet, von dem nach der Oeffnung e das Rohr f senkrecht emporgeht. Zwischen bc und dem Thermometer bewegt sich ein ringförmiger Rührer d, dessen zwei Träger durch die der Mitte nächsten beiden Oeffnungen des Deckels gehen.

In die Mündung des Schlangenrohres wird mittelst eines Korkstopfens ein Kniestück g eingesetzt. In dasselbe reicht das Röhrchen h bis nahe an das obere Ende hinein. Dadurch wird vermieden, dass die zwischen Verdampfungsgefäss und Calorimeter condensirte Flüssigkeit in das Calorimeter hinabläuft; es tritt so nur Dampf in dasselbe ein.

Die Flüssigkeit wird in einem Glaskolben K von ca. 100 cbcm Inhalt erwärmt. Der Dampf wird durch das Glasrohr G fortgeleitet; dasselbe ist mit Watte umwickelt und durch das blanke Metallrohr M geschoben. Ein doppelter, beiderseitig mit Stanniol beklebter Schirm hält die Wärmestrahlung des Kolbens vom Calorimeter ab. Dieses wird ausserdem zum Schutze gegen Luftströmungen mit einem 18 cm weiten Pappcylinder umgeben (beide sind nicht in der Figur gezeichnet). Der Rührer wird durch einen über die Rolle R gelegten Faden vom Beobachter in Bewegung gesetzt.

Uebung. 1) Man wägt das Calorimeter mit Deckel, aber ohne Thermometer und Zuleitungsstück g; Gewicht p'. Ist w'' der Wasserwerth des Thermometers, so ist $p'\sigma + w'' = w$ der gesammte Wasserwerth.

2) Man wägt das Calorimeter mit dem Thermometer: Gewicht p_1.

3) Man füllt das Calorimeter mit Wasser bis etwa 1 cm vom oberen Rande; Gewicht mit Thermometer: p_2, also die im Calorimeter enthaltene Wassermenge: $W = p_2 - p_1$.

4) Das Thermometer wird in das Calorimeter eingetaucht, der Pappmantel darüber geschoben, die Verbindung mit dem Erwärmungsgefässe durch das Kniestück g hergestellt und erhitzt. Man verfolgt den Gang des Thermometers und schreibt den Stand desselben von Minute zu Minute auf. Eine Zeit lang steigt das Thermometer sehr langsam, in Folge von Wärmeübertragung durch Zuleitung, ohne dass Dampf in das Calorimeter einströmt; sowie aber die Flüssigkeit so weit erwärmt ist, dass sich hinreichende Dampfmengen entwickeln und in das Calorimeter hinübertreten, steigt die Temperatur schnell an. In diesem Momente liest man die Temperatur ab und benutzt sie als Anfangstemperatur t_0.

5) Der Dampf wird so lange eingeleitet, bis die Temperatur des Calorimeters um 10 bis 20° gestiegen ist [1]). Dann unterbricht man die Dampfentwickelung und liest die Endtemperatur t ab.

6) Man liest während 10 Minuten am Ende jeder Minute die Temperatur ab.

7) Man nimmt das Calorimeter vom Stativ und bringt es mit

[1]) Wir lassen trotz des dadurch bedingten grossen Wärmeverlustes durch Strahlung die Temperatur so hoch steigen, damit einerseits die Menge des übergegangenen Dampfes nicht zu klein ausfalle und damit andererseits gerade der Einfluss der Strahlung recht augenfällig werde.

dem Thermometer auf die Waage; Gewicht: p_3. Also ist das Gewicht des condensirten Dampfes: $p_3 - p_2 = p$.

Die Uebung wird mit Wasser und Alkohol angestellt.

Einfluss der Strahlung. Während sich das Calorimeter über die Temperatur der Umgebung erwärmt, erfährt es fortwährend einen Wärmeverlust, der um so grösser ist, je höher seine Temperatur über der Temperatur der Umgebung liegt (s. oben S. 184).

Die Endtemperatur t würde daher eine höhere geworden sein, wenn die Strahlung nicht vorhanden gewesen wäre, man muss sie also um einen Betrag von δ^0 vermehren. Diese Correction δ erhält man aus den Ablesungen vor und nach dem Versuch.

Der Wärmeverlust würde, falls keine Wärmezufuhr stattfände, eine Abkühlung des erwärmten Körpers bewirken und wäre dieser proportional. Man kann die Annahme machen, dass er in gleichen Zeiten dem Temperaturüberschuss des erwärmten Körpers über die Temperatur der Umgebung proportional ist. Ist z. B. a die Temperaturerniedrigung des Körpers in einer Minute bei einem Temperaturüberschuss von 1^0, so ist er bei einem Temperaturüberschuss von x^0 gleich ax. Beobachten wir während ϑ Minuten eine Temperaturerniedrigung von y^0, während der Temperaturüberschuss im Mittel x^0 beträgt, so ist die mittlere Temperaturerniedrigung α in einer Minute:

$$\alpha = y/\vartheta = ax \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (1)$$

Es sei t_n die Temperatur der Umgebung, t_0 die Temperatur am Anfange des Versuches zur Zeit z_1, t_e diejenige im Momente des Eintretens von Dampf in das Calorimeter zur Zeit z_2, t die Endtemperatur, bei der die Dampfeinleitung abgebrochen wird, zur Zeit z_3, und t' die Temperatur ungefähr 10 Minuten nach Abschluss des Versuches zur Zeit z_4. Die einzelnen Abschnitte des Versuches dauern $\vartheta_1 = z_2 - z_1$, $\vartheta = z_3 - z_2$, $\vartheta_2 = z_4 - z_3$ Minuten. Während des ersten Abschnittes vor dem Einleiten des Dampfes ist der mittlere Ueberschuss x der Temperatur des Calorimeters über die Temperatur der Umgebung und die Temperaturänderung in einer Minute α_1:

$$x = {}^1/_2\,(t_o + t_e) - t_n, \quad \text{und} \quad \alpha_1 = (t_e - t_o)/\vartheta_1.$$

Nach Gleichung 1) ist also vor dem Versuch:

$$\alpha_1 = (t_e - t_o)/\vartheta_1 = a\,[{}^1/_2\,(t_o + t_e) - t_n].$$

Ein analoger Werth ergiebt sich für die entsprechende Grösse nach dem Einleiten des Dampfes:

$$\alpha_2 = (t - t')/\vartheta_2 = a\,[{}^1/_2\,(t + t') - t_n].$$

Die Gesammtausstrahlung während des Versuches ist nahezu so gross, als ob während der ganzen Dauer desselben die Temperatur des Calorimeters die mittlere von derjenigen am Anfang und am Ende

desselben gewesen wäre, in der ersten Hälfte des Versuches ist sie kleiner, als die so berechnete, in der zweiten dagegen grösser; der mittlere Strahlungsverlust während des Einleitens des Dampfes pro Minute ist also nach (1) nahezu:

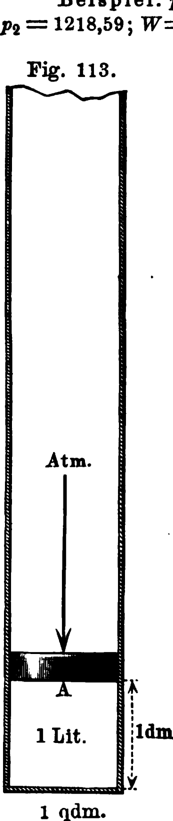
$$\alpha = a\left[\frac{1/2\,(t_o + t_e) + 1/2\,(t + t') - t_n}{2}\right] = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}.$$

Man braucht daher zur Bestimmung von α die Temperatur der Umgebung t_n gar nicht mit zu beobachten, falls diese nur constant ist.

Der durch Strahlung erfolgende Verlust ist, wenn der Versuch ϑ Minuten gedauert hat: $\delta = \alpha\vartheta$.

Beispiel: $p' = 423{,}72$ gr; $w' = 38{,}12$; $w'' = 0{,}38$; $w = 38{,}50$; $p_1 = 437{,}26$; $p_2 = 1218{,}59$; $W = 781{,}33$ gr; $t_o = 18{,}2$; $t_e = 19{,}4$; $t = 40{,}7$; $t' = 38{,}9$; $\vartheta_1 = 18$; $\vartheta = 16$; $\vartheta_2 = 10$; $\alpha_1 = 0{,}07$; $\alpha_2 = 0{,}18$; $\alpha = 0{,}12$; $\delta = 1{,}9$. Corrigirte Endtemperatur $t = 42{,}6$; $T = 99{,}3$; $p_3 = 1251{,}89$; $p = 33{,}30$ gr; $L = 544$ cal. (der richtige Werth ist 536,5 cal.). Bei Alkohol ergab sich $L = 212$ cal.

Fig. 113.



Allgemeines.

Die „latente Dampfwärme" entspricht einer geleisteten Arbeit, und zwar entspricht 1 Cal. (kgr, ^{0}Cels.) 427 mkgr (s. oben).

Mit dieser Wärme — resp. Arbeitsmenge — wird bei dem Verdampfungsprocess zweierlei geleistet:

1) Eine innere Arbeit, d. i. die Arbeit, welche nöthig ist, um die Cohäsionskräfte zwischen den einzelnen Flüssigkeitstheilchen zu überwinden und die Theilchen von einander zu entfernen; ferner kann eventuell die innere Energie der Molecüle gesteigert werden. Die dieser Arbeit entsprechende Wärmemenge heisst: die innere latente Verdampfungswärme.

2) Eine äussere Arbeit. Verdampft eine Flüssigkeit, so vergrössert sich ihr Volumen, sie muss also die auf ihr lastende Atmosphäre um einen gewissen Betrag zurückschieben. Wir berechnen die hierzu nöthige Arbeit und legen dabei das Wasser zu Grunde. 1 Liter oder 1 cbdm Wasser verdampfe bei 760 mm Druck bei 100^0 in einem Cylinder vom Querschnitt $A = 1$ qdm (Fig. 113). Es entstehen dabei rund 1610 Liter Wasserdampf, welche im Cylinder eine Höhe von 161 m einnehmen. Dabei wird das Gewicht der Atmosphäre auf 1 qdm $=$ 103,36 kgr um

rund 161 m gehoben, also ist die geleistete Arbeit 103,36 × 161 = 16 640 mkgr. Die dieser Arbeit entsprechende Wärmemenge heisst: die äussere latente Verdampfungswärme. Sie ist, da das mechanische Wärmeäquivalent 427 mkgr beträgt, gleich 16 540/427 = ca. 39 Wärmeeinheiten = 39 Cal. Da die ganze latente Dampfwärme bei 100^0 536,5 Cal. beträgt, so ist die innere latente Verdampfungswärme 536,5 — 39 = 497,5 Cal. Nur die äussere Verdampfungswärme wird zu Arbeitsleistungen bei Dampfmaschinen verwendet.

XII. Thermochemische Processe.

Einleitung. Die Thermochemie behandelt die bei chemischen Processen auftretenden Wärmemengen: „Wärmetönungen". Man stellt dieselben durch Nebeneinanderstellung der durch ein Komma getrennten Formeln der auf einander wirkenden Substanzen dar, welche zugleich die Mengen derselben angeben. So bedeutet (C, O_2) die bei der Bildung von CO_2 aus C und O_2 entwickelte Wärmemenge, (CO, O) die bei der Bildung von CO_2 aus CO und O entwickelte, ein beigesetztes aq. heisst, dass der Process in Gegenwart von viel Wasser, also in einer verdünnten Lösung vor sich gegangen ist. So ist z. B. (KHO aq., HCl aq.) die Neutralisationswärme von 1 Mol. Kalihydrat und 1 Mol. Chlorwasserstoffsäure in sehr verdünnter Lösung, (H_2, Cl_2 aq.) die Bildungswärme des Chlorwasserstoffs aus 1 Mol. Wasserstoff und 1 Mol. Chlor in Gegenwart von viel Wasser, in dem sich derselbe dann löst.

Als Ausgangspunkt für alle thermochemischen Betrachtungen dient folgender Satz:

Ein System einfacher oder zusammengesetzter Körper sei unter bestimmten Verhältnissen gegeben; dasselbe erfahre physikalische und chemische Veränderungen, welche das System in einen neuen Zustand überführen, ohne dass dabei eine äussere Arbeit geleistet wird. Dann hängt die bei diesen Aenderungen erzeugte oder verbrauchte gesammte Wärmemenge nur von dem Anfangszustande und Endzustande des Systems ab und ist unabhängig von der Art und Reihenfolge der Zwischenzustände.

Beispiel: Es ist (C, O_2) = (C, O) + (CO, O), d. h. die Wärmeentwickelung bei der Verbrennung von 1 Atom Kohlenstoff zu Kohlensäure ist die gleiche, mag man direct den Kohlenstoff zu Kohlensäure verbrennen oder ihn erst zu Kohlenoxyd und dieses dann zu Kohlensäure verbrennen. Die Versuche haben ergeben:

$$(C, O_2) = 94{,}0 \text{ Cal.}, \quad (C, O) = 25{,}8 \text{ Cal.}, \quad (CO, O) = 68{,}2 \text{ Cal.},$$
$$\text{also } (C, O) + (CO, O) = 94{,}0 \text{ Cal.}$$

Nach diesem Satze können wir z. B. aus den Verbrennungswärmen von Kohlenwasserstoffen die Bildungswärmen derselben aus Wasserstoff und Kohlenstoff berechnen. Dieselbe ist gleich der Summe der Verbrennungswärmen des in ihnen enthaltenen Kohlenstoffs und Wasserstoffs, vermindert um die Verbrennungswärme der Verbindung. So ist

z. B., wenn wir zunächst den Kohlenwasserstoff bilden und dann verbrennen:

$$[C_n, H_m, (n + {}^1/_4\,m) O_2] = (C_n, H_m) + [C_n H_m, (n + {}^1/_4\,m) O_2 = A.$$

Verbrennen wir dagegen Kohlenstoff und Wasserstoff sogleich zu Kohlensäure und Wasser, so ist:

$$[C_n, H_m, (n + {}^1/_4\,m) O_2] = (C_n, n O_2) + (H_m, {}^1/_4\,m O_2) = B.$$

Da $A = B$ sein muss, so ist:

$$(C_n, H_m) = [(C_n, n O_2) + (H_m, {}^1/_4\,m O_2)] - [C_n, H_m, (n + {}^1/_4\,m) O_2].$$

Die ersten beiden Glieder rechts stellen die Verbrennungswärme von Kohlenstoff und Wasserstoff zu Kohlensäure und Wasser dar, das letzte die Verbrennungswärme des Kohlenwasserstoffs zu denselben Producten.

Die bei chemischen Reactionen gemessenen Wärmetönungen geben nicht die beim Zusammentreten der Atome auftretenden Wärmemengen resp. die ihnen entsprechenden Verluste an Arbeitsvermögen. Der thermische Process bei der Bildung von Chlorwasserstoffsäure aus Wasserstoff und Chlor z. B. ist der folgende:

$$-(H, H) - (Cl, Cl) + 2(H, Cl);$$

derjenige bei der Bildung von Kaliumchlorid aus Kalihydrat und Chlorwasserstoffsäure (vorausgesetzt, dass wir es nicht mit Lösungen zu thun haben):

$$-(K, OH) - (H, Cl) + (K, Cl) + (H, OH).$$

Ausser den Bildungswärmen + (H, Cl), + (K, Cl), + (H, OH) treten also noch die Trennungswärmen — (Cl, Cl), — (H, H), — (H, Cl), — (K, OH) auf. Ebenso enthalten die in dem Ausdruck für die Verbrennungswärmen auftretenden Glieder ausser der Verbindungswärme der Atome zu der Verbindung noch die Trennungswärme derselben aus den Molecülen H_2, O_2, C_x; durch deren Zufuhr H_2 und O_2 in den atomistischen Zustand und der Kohlenstoff C_x in den gasförmigen und atomistischen Zustand übergeführt wird.

Wohl weil man diese Trennungswärmen noch nicht kennt, hat man erst so wenige allgemeine Resultate auf thermochemischem Gebiete erzielt.

1. Bestimmung der Neutralisationswärme.

Gebraucht wird: Apparat Fig. 114. Normal-Salzsäure und -Natronlauge, Normal-Oxalsäure und -Schwefelsäure.

Princip. Mischt man moleculare Mengen einer Säure und einer Basis mit einander, so findet dabei eine Wärmeentwickelung statt, welche man die Neutralisationswärme nennt. Bei einer mehrbasischen Säure kann man von einer Neutralisationswärme mit 1, 2 … *n* Aequivalenten Basis sprechen.

Mischt man in verdünnten Lösungen 1 Mol. Säure AH, und 1 Mol. Basis ROH, so tritt eine Wärmetönung auf:

$$Q = (\text{ROH aq., AH aq.}) = (\text{RA, } H_2O \text{ aq.}).$$

Resultirt bei der Bildung eine Flüssigkeitsmenge P von der specifischen Wärme c und steigt die Temperatur um t^0, so ist, wenn man den Wasserwerth des Gefässes vernachlässigt:

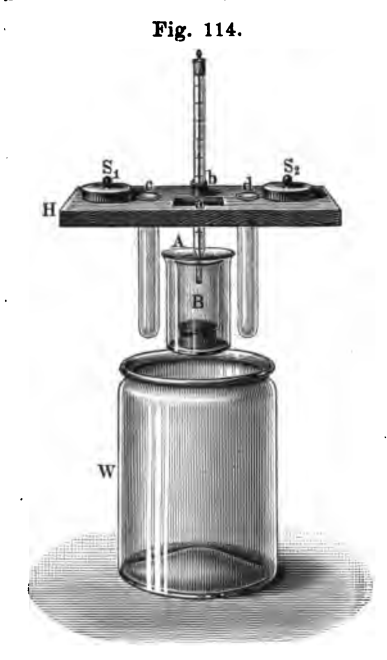
$$Q = Pct.$$

Mischt man von zwei Lösungen, die je ein Grammmolecül, d. h eine dem Moleculargewicht entsprechende Anzahl Gramme der beiden Substanzen im Liter enthalten, also von Normallösungen gleiche Volumina, und zwar einmal solche, welche 1 Mol., das zweite Mal solche, die $1/x$ Mol. enthalten, so ist die Temperaturerhöhung die gleiche, da im zweiten Falle nur $1/x \,.\, Q$ entwickelt, aber auch nur $1/x \,.\, P$ gr Flüssigkeit erwärmt wird.

Wird 1 Liter der einen Lösung mit 1 Liter der anderen Lösung gemischt, ist die Temperaturerhöhung gleich t^0, und werden die specifische Wärme und das specifische Gewicht der entstehenden Lösung gleich 1 gesetzt, was bei den meist angewandten relativ grossen Verdünnungen statthaft ist, so ist in grossen Calorien die Neutralisationswärme:

$$Q = 2t.$$

Fig. 114.



Apparat: In ein Wasserbad W von constanter Temperatur taucht zunächst ein Becherglas A, in welchem sich ein zweites, auf Kork stehendes Becherglas B als Calorimeter [1]) befindet (Fig. 114). Auf dem Wasserbade liegt ein Holzdeckel H, auf welchem die Gewichte S_1 und S_2 liegen, die den Auftrieb compensiren. In dem Glase B findet die Mischung der Lösungen statt, der Deckel hat dazu über B eine grössere Oeffnung a zum Eingiessen der Flüssigkeiten und eine kleinere b zum Einsetzen des Thermometers. Zum Umrühren benutzt man einen durch a eingeführten Rührer aus dünnem Glasrohr. Zwei mit je zwei Marken versehene Reagenzgläser dienen dazu, gleiche Volumina der Flüssigkeiten abzumessen. Damit dieselben in das gleiche Wasserbad eingetaucht werden können, besitzt der Deckel die Oeffnungen c und d.

---

[1]) Bei genauen Messungen müssen die Calorimeter aus Platin bestehen.

Uebung. 1) Man füllt das eine Reagenzglas, etwa c, bis zur unteren Marke mit Normal-Salzsäure, das andere, d, bis zu derselben Marke mit Normal-Natronlauge.

2) Man steckt die Gläser in die Oeffnungen c und d, das Thermometer durch b so tief, dass es fast bis zum Boden des Glases B reicht. Nach einiger Zeit haben die beiden Flüssigkeiten nahezu die dem ganzen Apparate gemeinsame Temperatur angenommen.

3) Man nimmt mittelst einer mit Kork ausgelegten Klammer das Glas c aus dem Wasserbade, giesst die Lösung der Säure durch a in das Glas B und liest die Temperatur t_1 ab.

4) In derselben Weise wird die Lösung der Basis aus dem Reagirglase d in B gegossen und die Temperatur t_2 nach erfolgter Neutralisation bestimmt. Dann ist die Temperaturerhöhung $t = t_2 - t_1$ und die gesuchte Neutralisationswärme $Q = 2\,(t_2 - t_1)$.

5) Man wiederholt den Versuch, wenn die Reagenzgläser bis zur oberen Marke gefüllt sind.

Beispiel: 1) $t_1 = 13{,}87$; $t_2 = 20{,}02$; $Q = 2 \,.\, 6{,}15 = 12{,}3$ Cal. 2) $t_1 = 15{,}01$; $t_2 = 21{,}11$; $Q = 2 \,.\, 6{,}10 = 12{,}2$ Cal. Die Zahlen sind etwas zu klein, da der Erwärmung des Glases nicht Rechnung getragen ist.

6) Analoge Versuche werden mit Oxalsäure und Schwefelsäure angestellt, aber so, dass man erst ein saures und dann ein neutrales Salz entstehen lässt.

Allgemeines.

Bei starken Säuren und Basen ist die Neutralisationswärme die gleiche, gleichgültig, welche Säure und welche Basis man nehmen mag. Die Neutralisationswärme ist etwa 13,4 bis 14,1 Cal. Diese Gleichheit der Neutralisationswärmen erklären Arrhenius, Ostwald etc. dadurch, dass die starken Basen, Säuren und die Salze derselben in den Lösungen vollkommen in ihre Ionen (S. 172 und bei Elektrolyse) zerfallen sind.

Verdünnte Lösungen, z. B. von Chlorwasserstoffsäure und Kalihydrat, Salpetersäure und Natronhydrat, enthalten nicht HCl, KOH, HNO_3, $NaOH$, sondern die Ionen $\overset{+}{H}$ und $\overset{-}{Cl}$, $\overset{+}{K}$ und $\overset{-}{OH}$, $\overset{+}{H}$ und $\overset{-}{NO_3}$, $\overset{+}{Na}$ und $\overset{-}{OH}$, diejenigen von Chlorkalium und Natriumnitrat nicht KCl und $NaNO_3$, sondern $\overset{+}{K}$ und $\overset{-}{Cl}$, $\overset{+}{Na}$ und $\overset{-}{NO_3}$.

Mischt man daher die Lösungen von HCl und KOH, von HNO_3 und $NaOH$, so bleiben beim Mischen $\overset{-}{Cl}$, $\overset{+}{K}$, $\overset{-}{NO_3}$, $\overset{+}{Na}$ unverändert, nur $\overset{+}{H}$ und $\overset{-}{OH}$ verbinden sich zu Wasser H_2O.

Nach dieser Annahme würde sich also die ganze auftretende Wärmetönung auf diejenige reduciren, welche der Bildung von 1 Mol. H_2O aus $\overset{+}{H}$ und $\overset{-}{HO}$ entspräche.

Weit complicirter ist das Verhalten von zweibasischen Säuren.

2. Bestimmung der Hydratationswärme.

Gebraucht wird: Calorimeter mit Korbrührer und Mantel (vgl. S. 200); Thermometer; wasserhaltiges und wasserfreies Chlorcalcium (gepulvert); Waage und Gewichte.

Princip. Zur Bestimmung der Hydratationswärme etwa bei der Hydratation von $CaCl_2$ zu $CaCl_2 + 6\,H_2O$, d. h. $(CaCl_2, 6\,H_2O) = x$ lösen wir

1) wasserfreies $CaCl_2$ in viel Wasser (Wärmetönung A),

2) $CaCl_2 + 6\,H_2O$ in viel Wasser (Wärmetönung B).

Die Wärmetönung bei dem Processe 1) besteht aus zwei Theilen: a) $(CaCl_2, 6\,H_2O)$, also der Hydratationswärme (positive Wärmetönung), b) $(CaCl_2 + 6\,H_2O, aq.)$, der Lösungswärme von $CaCl_2 + 6\,H_2O$ (negative Wärmetönung). Die Wärmetönung bei dem Processe 2) besteht nur aus der Wärmetönung $(CaCl_2 + 6\,H_2O, aq.)$.

Es ist

$$A = x + B \qquad x = A - B.$$

B ergiebt sich aber negativ zu $(- C)$ Calorien, so dass wird

$$x = A + C.$$

Apparat. Wie bei Lösungswärme (S. 200).

Uebung. Process 1. 1) Man wägt das Calorimeter mit Korbrührer: Gewicht p; dann ist der Wasserwerth des Calorimeters $w = p\sigma$. Der Wasserwerth des Thermometers sei δ (vergl. oben S. 179).

2) Man wägt den Rührer; Gewicht: p''.

3) Man füllt das Calorimeter etwa zur Hälfte mit Wasser von Zimmertemperatur und wägt es; Gewicht: W'_1. Dann ist das Gewicht des Wassers: $W_1 = W'_1 - (p - p'')$.

4) Man bringt in den Rührer eine nicht zu grosse Menge des wasserfreien Salzes, das eine Zeit lang in einem verschlossenen Gefässe neben dem Calorimeter im Calorimetermantel gestanden hat (etwa 2 gr auf 100 gr Wasser).

5) Man bestimmt die Anfangstemperatur t_1.

6) Man senkt den Rührer in das Calorimeter und löst durch Umrühren das Salz. Wenn die Temperatur constant geworden ist, liest man den Stand des Thermometers ab: T_1.

7) Man wägt das Calorimeter; Gewicht: P'_1. Dann ist die Menge gelöster Substanz $P_1 = P'_1 - p - W_1$.

Process 2. 1) Man trocknet den Rührer, füllt das Calorimeter zur Hälfte mit Wasser und wägt; Gewicht: W'_2.

2) Man füllt den Rührer mit dem wasserhaltigen Salze (etwa 10 gr auf 100 gr Wasser) und wägt; Gewicht: P'_2.

3) und 4) wie oben unter 5) und 6); Anfangstemperatur t_2; Endtemperatur T_2.

Berechnung. Process 1. Die entwickelte Wärmemenge ist $(W_1 + w + \delta + P_1)(T_1 - t_1)$, wenn die specifische Wärme der entstandenen Lösung gleich 1 gesetzt wird. Die pro Gewichtseinheit gelösten Salzes entwickelte Wärmemenge ist:

$$\frac{(W_1 + w + \delta + P_1)(T_1 - t_1)}{P_1} \text{ cal.}$$

Die dem Moleculargewicht M_1 ($CaCl_2 = 111$) zukommende Wärmetönung ist

$$A = \frac{(W_1 + w + \delta + P_1)(T_1 - t_1)}{P_1} M_1 \text{ cal.}$$

Process 2. Die verbrauchte, dem Calorimeter entzogene Wärmemenge ist: $-(W_2 + w + \delta + P_2)(t_2 - T_2)$, wo $W_2 = W'_2 - (p - p'')$. Die dem Moleculargewicht M_2 ($CaCl_2 + 6\,H_2O = 219$) entsprechende Wärmetönung ist:

$$B = \frac{-(W_2 + w + \delta + P_2)(t_2 - T_2)}{P_2} M_2 = -C;$$

$$x = A - (-C) = A + C.$$

Beispiel: 1) $p = 35$; $\delta = 0{,}3$; $w = 3{,}5$; $P_1 = 2$ gr; $W_1 = 100$ gr; $t_1 = 17{,}46^0$; $T_1 = 20{,}12^0$. Wärmetönung: 105,8 . 2,66 = 281 cal.; $A = +15596$ cal. oder 15,6 Cal.

2) $P_2 = 10$ gr; $W = 100$ gr; $t_2 = 17{,}40^0$; $T_2 = 15{,}66^0$. Wärmetönung: $-$ 113,8 . 1,74 = $-$ 198 Cal.; $B = -4336$ cal. $= -C$ oder $C = 4{,}3$ Cal. Also $x = 19{,}9$ Cal.

C. Optik.

Die Optik, die Lehre vom Licht, lässt sich in zwei Theile zerlegen:

1. Wir betrachten einen gegebenen Lichtstrahl und untersuchen seine Eigenschaften und die Veränderungen, die er erfährt, wenn er auf andere Körper trifft und an ihnen reflectirt oder gebrochen wird und wenn er mit einem anderen, von derselben Lichtquelle ausgegangenen Strahl sich schneidet: Helligkeit, Reflexion, Brechung, Polarisation, Beugung, Interferenz, Doppelbrechung, Drehung der Polarisation.

2. Wir untersuchen a) die Erscheinungen der Lichtemission, den Zusammenhang zwischen der Beschaffenheit eines Lichtstrahles und der Natur des Körpers, der ihn aussendet; b) die Erscheinungen der Lichtabsorption und den Zusammenhang zwischen ihr und der Constitution des absorbirenden Körpers: Spectralanalyse.

Selbstverständlich greifen die beiden Gebiete mannigfach in einander.

In der chemischen Optik werden die Beziehungen zwischen den chemischen und optischen Eigenschaften der Körper behandelt.

Fig. 115.

Das Licht besteht aus schwingenden Bewegungen (vgl. S. 9) eines im Weltraume und in den einzelnen Körpern verbreiteten Stoffes von sehr geringer Dichte, des sogen. Lichtäthers. Diese Anschauung, die Undulationstheorie, von dem Wesen des Lichtes hat sich allmählich gegenüber derjenigen von Newton Bahn gebrochen, der annahm, dass die Lichtstrahlen durch kleine, fortgeschleuderte Theilchen gebildet werden (Emissions- oder Emanationstheorie).

Nach der elektromagnetischen Lichttheorie sind die Lichtbewegungen durch periodische Veränderungen in dem elektrischen und magnetischen Zustande des Aethers bedingt.

Die Schwingungen im Lichtäther erfolgen senkrecht zu der Fortpflanzungsrichtung des Lichtstrahles, sie sind

transversal; im Gegensatz zu denen des Schalles, die longitudinal sind.

Eine transversale Wellenbewegung, die in einer Ebene erfolgt, stellt Fig. 115 dar. Während eines Hin- und Herganges eines Aethertheilchens, also während der Schwingungsdauer T, pflanzt sich die Wellenbewegung um die Wellenlänge λ fort, in der Figur z. B. von dem mit 0 bezeichneten Punkte bis zu dem mit 4/4 bezeichneten; die Strecke 0 bis 2/4 ist eine halbe Wellenlänge. Die Lichtgeschwindigkeit v ist die Strecke, um welche sich die Lichtwellenbewegung während einer Secunde fortpflanzt. Ist z die Zahl der Schwingungen in der Secunde, die Schwingungszahl, so bestehen folgende Relationen:

$$z = 1/T; \quad v = z\lambda = \lambda/T;$$
$$\lambda = vT = v/z.$$

Die Lichtgeschwindigkeit v ist im luftleeren Raume für Strahlen von jeder Schwingungsdauer gleich und beträgt nahezu 300000 km/sec. $= 3 . 10^{10}$ cm/sec. In materiellen Körpern ist dieselbe kleiner als im Vacuum und für Strahlen von verschiedener Schwingungsdauer verschieden.

Durch die Schwingungsweite und zwar das Quadrat derselben ist die Intensität, durch die Schwingungsdauer T die Qualität der Lichtstrahlen, d. h. die Farbe derselben bestimmt, wie in der Akustik durch die entsprechenden Grössen die Tonstärke und die Tonhöhe.

Strahlen, welche nur Schwingungen einer einzigen Schwingungszahl enthalten, liefern sogenanntes homogenes Licht; jedes andere Licht wird als unhomogenes oder gemischtes Licht bezeichnet.

Unhomogenes Licht ist z. B. das weisse Licht, dasselbe wird durch ein Prisma etc. in seine Bestandtheile zerlegt, die das Spectrum bilden (Fig. 116).

Die Wellenlängen λ in Millontel Millimetern ($\mu\mu = 10^{-7}$ cm) und die Schwingungszahlen z sind für die verschiedenen Farben im Mittel:

Fig. 116.



Roth	$\lambda = 683\,\mu\mu$	$z = 437$ Bill.	Blau	$\lambda = 473\,\mu\mu$	$z = 631$ Bill.
Orange	615	485	Indigo	439	679
Gelb	559	534	Violett	410	728
Grün	512	582			

Um die einzelnen Theile des Spectrums zu definiren, benutzt man die mit den grossen und kleinen Buchstaben des Alphabets bezeichneten dunklen Fraunhofer'schen Linien (vergl. Fig. 116) des Sonnenspectrums, oder die hellen, von leuchtenden Gasen gelieferten Linien. Besonders hierzu verwendet werden:

Die Wasserstofflinien $H_\alpha = C$, $\lambda = 656{,}3$; $H_\beta = F$, $\lambda = 486{,}1$; $H_\gamma\ \lambda = 434{,}0$; $H_\delta = h$, $\lambda = 410{,}2$. Die Natriumlinie D, $\lambda = 589{,}3$. Die Lithiumlinie $\lambda = 670{,}8$, die grüne Thalliumlinie $\lambda = 535{,}1$. Die blaue Strontiumlinie $\lambda = 460{,}8$. Im Ultraviolett Cadmium-, Zink- und Aluminiumlinien.

Das Auge empfindet als Licht nur Aetherschwingungen, deren Wellenlänge etwa zwischen 820 und 373 $\mu\mu$ liegt; Aetherschwingungen mit grösserer Wellenlänge als 820 $\mu\mu$ bezeichnet man als infraroth, sie sind besonders durch starke Wärmewirkungen ausgezeichnet; die Schwingungen mit kürzerer Wellenlänge als 373 $\mu\mu$ heissen ultraviolette, sie sind besonders durch starke chemische Wirksamkeit ausgezeichnet. Indess rufen auch die sichtbaren Strahlen Wärme- und chemische Wirkungen hervor; die ultravioletten auch Wärme-, die infrarothen auch chemische Wirkungen; im sichtbaren Spectrum sind z. B. die physiologischen, chemischen und Wärmewirkungen die Folgen einer verschiedenen Art der Umwandlung der Energie der betreffenden Lichtstrahlung.

I. Photometrie.

Gebraucht wird: Optische Bank; Träger mit einem Licht, Träger mit vier Lichtern, mit dem Bunsen'schen Photometer, oder dem Joly'schen Diffusionsphotometer, oder dem Lummer-Brodhun'schen Photometer; Amylacetateinheitslampe, Gaslampe mit Rundbrenner und Cylinder, Flachbrenner; Rauchgläser, Gasuhr.

Einleitung. Die Energie der von einem leuchtenden Theilchen a ausgehenden Lichtbewegung breitet sich in einem nach allen Richtungen hin gleich beschaffenen, also isotropen Medium (z. B. der Luft) überall hin gleich schnell aus, die in einem gegebenen Momente in a erregte Energie setzt daher nach Verlauf einer beliebigen Zeit Theilchen in Bewegung, welche auf einer um a beschriebenen Kugeloberfläche gelegen sind. Bei doppelt so grossem Abstande r von dem Theilchen a vertheilt sich die Energie über eine viermal so grosse Fläche, sie übt auf die Flächeneinheit dieser Kugel also eine viermal geringere Wirkung aus, als auf die Flächeneinheit der Kugel vom Radius 1, falls das Zwischenmedium nicht absorbirend wirkt. Daher ist die Erleuchtung gleich grosser Flächen umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung von dem leuchtenden Punkte.

Princip der Helligkeitsmessungen: Beleuchtet man einen Schirm mit einer Lichtquelle, welche ihm in der Entfernung 1 die Helligkeit i_1 ertheilen würde, aus der Entfernung r_1, so ist die Helligkeit des Schirmes $I_1 = i_1/r_1^2$. Entsprechend ist die Helligkeit I_2 des Schirmes, wenn er durch eine Lichtquelle, welche ihm in der Entfernung 1 die Helligkeit i_2 ertheilt, in der Entfernung r_2 beleuchtet wird, $I_2 = i_2/r_2^2$.

Erscheint der Schirm von beiden Lichtquellen bei senkrechter Incidenz gleich hell erleuchtet, ist also $I_1 = I_2$, so ist $i_1/r_1^2 = i_2/r_2^2$ $i_1/i_2 = r_1^2/r_2^2$.

Die Intensitäten zweier Lichtquellen verhalten sich wie die Quadrate der Entfernungen, aus denen sie den Schirm gleich stark beleuchten.

Zur Vergleichung der Intensitäten zweier Lichtquellen dient das Photometer; wir erwähnen das Bunsen'sche Photometer, das Joly'sche Diffusionsphotometer und das Lummer-Brodhun'sche Photometer[1]) (über das Spectrophotometer s. w. u.).

---

[1]) Hingewiesen sei auch auf das Weber'sche Photometer.

Als Lichteinheit diente früher das Licht einer Kerze von bestimmter Beschaffenheit, neuerdings dasjenige einer Amylacetatlampe bei 40 mm Flammenhöhe.

Die Amylacetatlampe nach Hefner von Alteneck giebt Fig. 117 wieder. In dem Gefässe *G* befindet sich der Amylalkohol, in den ein durch *a* gehender Docht eintaucht; derselbe kann durch die Schraube mit Trieb *r* auf und nieder bewegt werden.

Zum Einstellen der Flamme auf die Höhe von 40 mm, bei der die Helligkeit die normale ist, wird auf die Lampe ein Ring *p* aufgesetzt. An ihm ist ein Stutzen *s* befestigt, der an seinem oberen Ende ein horizontales Rohr *og* trägt. Bei *o* ist in dasselbe eine Sammellinse eingesetzt, bei *g* eine matte Glasplatte mit einem schwarzen Strich. Man regulirt die Flamme, bis das Bild der Spitze derselben gerade bis zum Strich reicht.

Fig. 117.



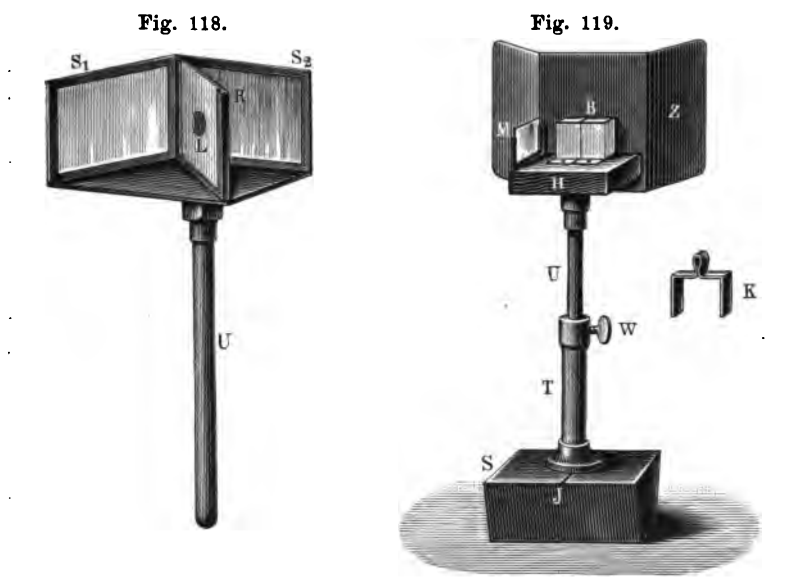
Apparate. Die erwähnten Photometer werden auf einer optischen Bank verschoben, einer etwa $2^1/_2$ m langen Holzleiste, welche an einer Seite eine Theilung in Centimeter besitzt. In dieselbe werden Klötze *S* (Fig. 119) gesetzt, welche hohle Säulen *T* tragen, in denen die Stiele *U* von Tischen, Lampen und dergleichen mittelst Schrauben *W* in verschiedenen Höhen befestigt werden können (s. Fig. 119). Die Klötze haben auf beiden Seiten einen als Index dienenden Strich *J*.

1. Das Bunsen'sche Photometer (Fig. 119) besteht aus einem Rahmen *R*, der nach Töpler zwischen zwei Glasplatten drei Lagen von Oelpapier enthält; aus der mittelsten ist ein kreisrundes Loch *L* herausgeschnitten. Dadurch entsteht auf dieser Papierschirmfläche ein Fleck, der hell auf dunklem Grunde erscheint, wenn die Rückseite stärker als die Vorderseite erleuchtet wird, dunkel auf hellem Grunde im umgekehrten Falle, und auf beiden Seiten gleich hell, wenn beide Seiten gleich stark erleuchtet werden. Um zu erkennen, ob letzteres der Fall ist, sind an dem Rahmen zwei Spiegel S_1 und S_2 befestigt; der vor dem Photometer sitzende Beobachter blickt in diese und vergleicht die Helligkeiten der Spiegelbilder beider Photometerseiten mit einander.

2. Das Diffusionsphotometer (nach Joly) trägt auf einem

schwarz gebeizten Holzbrett *H* (Fig. 119) zwei Paraffinklötze von 18 × 18 × 38 mm, die aus einem grösseren, möglichst homogenen Paraffinstück ausgeschnitten sind. Beide sind mit je einer der 18 × 38 mm grossen ebenen Flächen auf einander gedrückt und werden, vertical neben einander stehend, von einem geschwärzten Blech *B* gehalten. Vor ihnen ist ein schwarzer, _/-förmig gebogener Schirm *Z* mit einem 20 × 36 mm grossen Ausschnitt so befestigt, dass letzterer von der Fuge zwischen beiden Klötzen gerade halbirt wird. Der durch den Schirm vor seitlichem Licht geschützte Beobachter blickt auf die Fuge. Ein Blechbügel *K* schützt die Klötze, wenn sie nicht gebraucht werden, vor Staub; auf einer Seite des Brettes ist ein Rahmen *M* zur Aufnahme von Absorptionsgläsern angebracht. Die stärker beleuchtete

Fig. 118. Fig. 119.

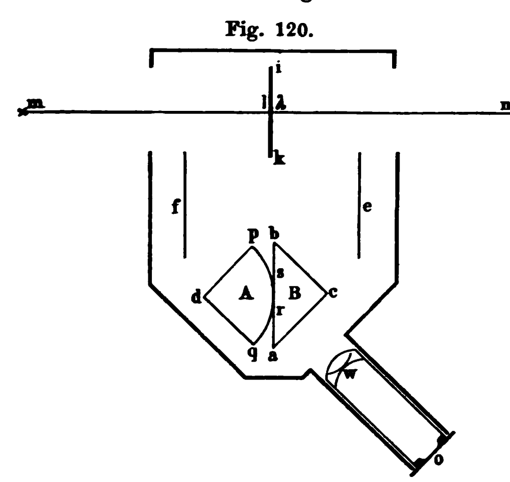


Hälfte des Paraffinstückes erscheint heller; bei gleich starker Beleuchtung beider verschwindet die Trennungsfuge fast vollkommen.

3. Das Lummer-Brodhun'sche Photometer beruht ebenfalls darauf, dass zwei sich berührende, von zwei Lichtquellen beleuchtete Flächen auf gleiche Helligkeit gebracht werden. Fig. 120 (a. f. S.) giebt einen Querschnitt des Instrumentes. Lothrecht zur Photometerbank *mn* steht der Schirm *ik* aus zwei Papierblättern, zwischen welche Stanniol gelegt ist. Das diffuse, vom Schirm ausgehende Licht fällt auf die Spiegel *e* und *f*, welche es senkrecht auf die Kathetenflächen *bc* und *dp* der beiden Glasprismen *B* und *A* werfen. *B* ist ein total reflectirendes Prisma mit ebener Hypotenusenfläche, während beim Prisma *A* nur die das Prisma *abc* berührende Kreisfläche *rs* eben ist, der übrige Theil *qr* und *sp* dagegen einer Kugelfläche angehört. Alles auf diese

Berührungsfläche *rs* auffallende Licht geht vollständig hindurch, so dass das bei *o* befindliche Auge des Beobachters Licht von *f* nur durch die Berührungsfläche *rs* hindurch, dagegen von *e* her nur diejenigen Strahlen, welche an *ar* und *sb* total reflectirt werden, erhalten kann. Stellt man die verschiebbare Lupe *w* scharf auf die Fläche *arsb* ein, so erblickt man im Allgemeinen einen scharf begrenzten hellen oder dunklen Fleck in einem gleichmässig erleuchteten Felde. Bei gleicher Helligkeit der Flächen *l* und *λ* verschwindet dieser Fleck.

Fig. 120.



1. Prüfung des Gesetzes der Abnahme der Erleuchtung mit dem Quadrate der Entfernung.

Uebung. 1) Der Träger mit einem Lichte wird auf die Photometerbank gestellt; sein Index entspreche dem Theilstrich α der Bank.

2) Der Träger mit vier Lichtern wird nach einander auf verschiedene Theilstriche A gestellt und die Photometer so zwischen beiden Lichtquellen eingestellt, dass bei dem Bunsen'schen Photometer der Fleck auf beiden Seiten gleich stark gegen die (hellere) Umgebung contrastirt, bei dem Joly'schen und Lummer-Brodhun'schen die Trennungslinien verschwinden. Die Höhe der beiden Lichtquellen und die der Photometeraxe muss die gleiche sein.

3) Man liest die Stellung des Photometers a ab.

Die Differenzen $a - \alpha$ und $A - a$ sind dann die Entfernungen der Lichtquellen, in denen sie dieselbe Fläche gleich stark erleuchten.

Man findet, dass sehr nahe $A - a = 2(a - \alpha)$ ist.

2. Vergleichung zweier Lichtquellen.

Uebung. 1) Man stellt die Amylacetatlampe (oder Normalkerze) (Helligkeit I) auf einen bestimmten Theilstrich.

2) Man stellt die zweite Lichtquelle, z. B. eine Gaslampe, auf einen anderen, z. B. einen Meter davon entfernten Theilstrich.

3) Man verschiebt das Photometer, bis die Wirkung beider Lichtquellen auf dasselbe gleich ist. Ist I die Helligkeit der Lampe, L die Entfernung der Lampe, l die der Einheitslampe vom Schirm, so ist:

$$I : 1 = L^2 : l^2 \quad \text{und} \quad I = L^2/l^2 \text{ Einheiten}$$ [1]).

Beispiel: Bei der Vergleichung einer Gaslampe mit Rundbrenner mit der Amylacetateinheitslampe war $L = 80$ cm, $l = 20$ cm; also ist $I = 16$ Einheiten.

3. Vergleich der Lichtmengen, welche ein Flachbrenner nach verschiedenen Seiten hin aussendet.

Uebung. 1) Der Träger mit dem Flachbrenner wird auf einen bestimmten Theilstrich gestellt, so dass a) die Flammenfläche parallel der Photometeraxe verläuft.

2) Man vergleicht seine Helligkeit mit der Einheitslampe; sie sei I_a.

3) Man stellt den Flachbrenner b) senkrecht zur vorigen Stellung und bestimmt wieder die Helligkeit; sie sei I_b.

$I_a = L_1^2/l_1^2$, $I_b = L_2^2/l_2^2$, und das Verhältniss:

$$\frac{I_a}{I_b} = \frac{L_1^2 l_2^2}{L_2^2 l_1^2}.$$

Beispiel: Bei a) wurde gefunden: $l_1 = 20{,}7$ cm, $L_1 = 78{,}3$ cm; also $I_a = 14{,}7$; bei b): $l_2 = 19{,}0$, $L_2 = 81{,}0$, also $I_b = 18{,}2$, und $I_a/I_b = 0{,}81$.

Der Brenner sendet in einer zur Flammenebene senkrechten Richtung mehr Licht aus, als in der Richtung der Flammenebene selbst. Dies rührt daher, dass beim Beleuchten einer Fläche von der Schmalseite der Flamme her eine grössere Zahl von leuchtenden Theilchen durch davor liegende verdeckt werden. (Die in der Flamme leuchtenden Kohlenpartikelchen sind undurchsichtig.) Dagegen ist der subjective Eindruck, den das auf die Flamme blickende Auge erhält, intensiver beim Sehen auf die Schmalseite, weil sich dabei die Bilder einer grösseren Anzahl leuchtender Theilchen auf denselben Stellen der Netzhaut über einander lagern, als wenn man auf die Breitseite blickt.

4. Beziehung zwischen Gasconsum und Lichtstärke.

Uebung. 1) Man schaltet in die Zuleitung einer Gaslampe eine Gasuhr ein, macht die Lampe möglichst hell, stellt sie auf einen Theilstrich der optischen Bank, die Einheitslampe auf einen anderen.

2) Nachdem die Gasuhr eine Zeit lang im Gange gewesen ist, bestimmt man die Helligkeit I_1 der Gaslampe.

3) Man liest bei einer vollen Minute den Stand der Gasuhr s_1 ab. Nach n Minuten liest man wieder ab: s_2. Der Gasconsum ist in Litern pro Minute $S = (s_2 - s_1)/n$ Liter.

4) Man bestimmt die Helligkeit wieder: I_2. Dann ist die mittlere Helligkeit während der Versuchsdauer $I = \frac{1}{2}(I_1 + I_2)$.

5) Man dreht die Flamme klein und bestimmt die mittlere Helligkeit i und den Consum s pro Minute.

---

[1]) Genauere Resultate erhält man für das Verhältniss der Helligkeiten zweier Lichtquellen, wenn man sie nach einander mit ein und derselben Lichtquelle vergleicht, welche dann auf derselben Photometerseite stehen bleibt.

6) Man wiederholt den Versuch b) mit einem Flachbrenner und c) mit einem Auer'schen Gasglühlicht.

Beispiel: a) $I = 36{,}6$ Einheiten E; $S = 2{,}8$ l; $i = 7{,}2\,E$; $s = 1{,}8$ l; die Helligkeit wächst also nicht proportional dem Gasconsum, sondern (innerhalb der Versuchsgrenzen) schneller als dieser. b) $I = 11{,}0\,E$; $S = 2{,}5$ l; $i = 1{,}2\,E$; $s = 0{,}34$ l. c) $I = 72\,E$, $S = 1{,}2$ l; $i = 12\,E$, $s = 0{,}9$ l.

Bemerkung. Bei genaueren Bestimmungen liest man an der Gasuhr noch den Druck und die Temperatur ab, und reducirt das verbrauchte Gasvolumen auf 760 mm und 0°, S. 84.

5. **Bestimmung des Absorptionscoëfficienten eines Rauchglases.** Geht Licht durch einen dasselbe absorbirenden Körper, etwa durch ein dunkles Glas, so wird es geschwächt. Ist I die Intensität des auffallenden und I_1 diejenige des durchgegangenen Lichtes, so ist

$$I_1 = \varepsilon_1 I,$$

wo ε_1 ein echter Bruch ist. Derselbe giebt das Verhältniss des durchgegangenen Lichtes zum auffallenden an; ε_1 ist die durch das Glas bewirkte Extinction. Der Rest der Energie des Lichtes ist in dem Glase geblieben, er ist absorbirt worden. Die Absorption $A = 1 - \varepsilon_1$ giebt an, der wievielte Theil des auffallenden Lichtes in dem absorbirenden Medium zurückbleibt.

Stellt man hinter das erste Absorptionsglas ein zweites von der Extinction ε_2, so ist die Intensität des auf dieses auffallenden Lichtes I_1, die des durch dasselbe durchgegangenen Lichtes $I_2 = \varepsilon_2 I_1 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 I$, wenn man absieht von den Lichtverlusten durch Reflexionen an den Oberflächen des Glases; die Extinction durch zwei Absorptionsgläser ist also gleich dem Producte der Extinctionen der beiden Gläser für sich; die durch beide Gläser herbeigeführte Absorption ist $1 - \varepsilon_1 \varepsilon_2$. Stellt man n Gläser von gleicher Substanz und von gleicher Dicke, deren Extinction ε ist, hinter einander, so wird das Licht auf $\varepsilon^n I$ geschwächt und $A_n = (1 - \varepsilon^n) I$ wird von der auffallenden Lichtmenge absorbirt.

Misst man die Dicken in Centimetern, setzt man $\varepsilon = e^{-\alpha}$ ($e = 2{,}71828$), und ist die Extinction durch eine Platte von der Dicke von 1 cm gleich $\varepsilon = e^{-\alpha}$, so ist die Extinction für eine Platte aus derselben Substanz, aber der Dicke von d cm gleich $(e^{-\alpha})^d = e^{-\alpha d}$. Die Absorption ist gleich $(1 - e^{-\alpha d})$.

Zwei Platten aus derselben Substanz und den Dicken d_1 und d_2 schwächen einfallendes Licht von der Intensität I bis auf I_1 resp. I_2, wo

$$I_1 = I e^{-\alpha d_1}, \qquad I_2 = I e^{-\alpha d_2} \text{ ist.}$$

Hieraus ergiebt sich:

$$\alpha = -\frac{1}{d_1 - d_2} \cdot \frac{\log I_1 / I_2}{\log e};$$

α heisst der Extinctionscoëfficient.

Aus Bestimmungen von I_1 und I_2 an zwei Platten von den Dicken d_1 und d_2 aus derselben Substanz kann man daher α für die betreffende Substanz bestimmen.

Uebung. 1) Man bestimmt die Helligkeit einer Gaslampe erst ohne Einschaltung eines Absorptionsglases (Rauchglases) I in Acetat-Einheiten.

2) Nach Einschaltung desselben bei M (Fig. 118) sei die auf das Photometer fallende Lichtmenge I_1 Einheiten; dann ist: $\varepsilon_1 = I_1/I$.

3) Nach Einschaltung eines anderen Absorptionsglases: I_2 Einheiten; dann ist: $\varepsilon_2 = I_2/I$.

4) Nach Einschaltung beider Absorptionsgläser: I_3 Einheiten; dann ist: $\varepsilon_3 = I_3/I$. Man findet, dass sehr nahe $\varepsilon_3 = \varepsilon_1 . \varepsilon_2$ ist.

5) Man misst die Dicken der Absorptionsgläser d_1 und d_2; dann ist: $\alpha = - \frac{1}{d_1 - d_2} \cdot \frac{\log I_1/I_2}{\log e}$.

Beispiel: Ohne Absorptionsglas war die Helligkeit einer Gaslampe 16 Einheiten. Als man in den Gang der Strahlen ein Absorptionsglas brachte, war $I_2 = 2,25$ Einheiten. Durch das Glas wurde die Helligkeit der Lampe also vermindert im Verhältniss von 16 zu 2,25, die durchgegangene Lichtmenge war nur 2,25/16,00 = 0,14 der auffallenden. Es ist also $\varepsilon_1 = 0,14$ oder rund $^1/_7$. Das Glas bewirkt eine Schwächung des Lichtes auf $^1/_7$ (Extinction), $^6/_7$ verbleiben im Glase (Absorption).

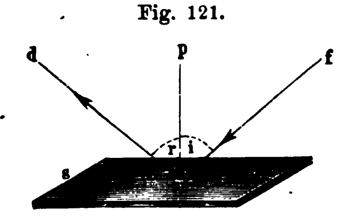
Ein zweites Glas gab $\varepsilon_2 = 0,27$, beide zusammen $\varepsilon_3 = 0,04$, nahezu $= \varepsilon_1 . \varepsilon_2$. Ueber Berechnung von α aus den Extinctionen zweier verschieden dicker Schichten derselben Lösung vergl. bei Spectrophotometer.

II. Reflexion des Lichtes.

Gebraucht wird: Reflexionsgoniometer; schwarze Glasplatte; Klebwachs; Glasprisma von 45°; ein Stück Kalkspath. Optische Bank; Hohlspiegel; matte Glasplatte; Papierschirm; Beleuchtungslampe mit Schwarzblechcylinder, Augenspiegel, Papierblatt. Zwei Kerzen mit Stativen, Ablesefernrohr mit Scala, Convexspiegel, Scala mit Stativ (S. 233).

Einleitung. Trifft ein in einem Medium (1), etwa Luft, fortschreitender Lichtstrahl von f kommend (Fig. 121) auf eine ebene Fläche, die einen zweiten Körper (2), etwa Glas, begrenzt, so wird ein Theil des Lichtes zurückgeworfen, reflectirt, ein anderer dringt in das zweite Medium ein. Man errichtet in dem Punkte n, welcher von dem einfallenden Lichtstrahl getroffen wird, eine Senkrechte np auf der Trennungsfläche (das Einfallsloth); der Winkel, den der einfallende Strahl fn mit dem Einfallsloth bildet, heisst der Einfallswinkel, derjenige, den der reflectirte Strahl nd mit demselben bildet, der Reflexionswinkel. Es gelten folgende Sätze:

Fig. 121.



1. Der einfallende Strahl fn, das Einfallsloth np und der reflectirte Strahl nd liegen in einer Ebene.

2. Der Einfallswinkel ist gleich dem Reflexionswinkel.

3. Das Bild eines Gegenstandes in einem ebenen Spiegel liegt ebenso weit hinter dem Spiegel, wie der Gegenstand sich vor demselben befindet.

Das Auge verlegt den Gegenstand dahin, wo die nach der Reflexion in das Auge fallenden Strahlen sich zu schneiden scheinen. Treffen sich, wie in diesem Falle, Strahlen nicht wirklich in einem Punkte, sondern nur deren Verlängerungen nach rückwärts, so spricht man von einem virtuellen Bilde. Reelle Bilder sind dagegen solche, bei denen die Lichtstrahlen sich wirklich durchkreuzen (vergl. auch den Abschnitt: Linsen).

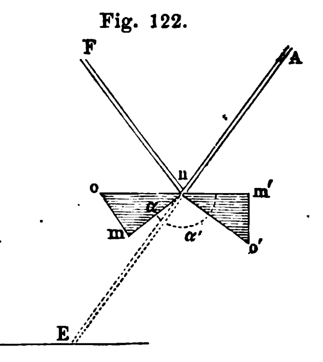
4. Die Bilder bei ebenen Spiegeln sind virtuelle Bilder.

1. Reflexionsgoniometer.

Princip. Um den Winkel α zwischen zwei ebenen spiegelnden Flächen nm und no, z. B. an einem Prisma (Krystall), zu messen, lässt

man dasselbe Lichtstrahlenbündel in derselben Richtung einmal von der einen, dann nach Drehung des Prismas um die Schnittlinie der beiden Flächen von der anderen Fläche reflectiren; der Winkel α', um den man dabei das Prisma drehen muss, ergänzt den zu messenden α zu 180^0. Blickt etwa das Auge, Fig. 122, in der Richtung AE dicht an dem Prisma onm vorbei nach der festen Marke E, so erhält es gleichzeitig Strahlen, die aus der Richtung Fn auf die Prismafläche on fallen und von dieser nach nA hin reflectirt werden, und solche, die von E kommen. Dreht man das Prisma um eine zu der Ebene EFA (Zeichnungsebene) senkrechte Axe um einen Winkel α', und zwar so lange, bis es in eine solche Lage $o'nm'$ gekommen ist, dass die von F kommenden Strahlen von der Fläche nm' nach nA hin reflectirt werden, wobei sie dem Auge aus derselben Richtung, wie die von E zu kommen scheinen, so liegt die Ebene nm' parallel zu no. Offenbar ist:

Fig. 122.



$$\alpha = 180^0 - \alpha'.$$

Liegt die Ebene EFA vertical, also die Kante n und die ihr parallele Drehungsaxe des Prismas horizontal, so scheint der Punkt F dem in A befindlichen Auge sich bei der Drehung des Prismas in verticaler Richtung zu bewegen.

Apparat. 1. Das Goniometer nach Wollaston, Fig. 123 (a. f. S.). Mittelst des Knopfes G lässt sich die getheilte Scheibe E um eine horizontale Axe drehen[1]) und ihre Stellung an einem Index am Arme QR ablesen. Sie lässt sich an der Kreisplatte F durch die Druckschraube STU festklemmen. An der durch G hindurchgehenden, mit dem Knopfe I verbundenen Axe ist der Bügel KLM befestigt, der die in der Hülse N drehbare Axe OQ trägt. Bei Q wird das Prisma a mit etwas Klebwachs oder besser in einer mit einem Kugelgelenk an der Axe OQ sitzenden Zange befestigt.

Dem Apparate gegenüber wird die Verticalrichtung und eine bestimmte Höhe bezeichnet, am einfachsten durch den verticalen Stab und eine Quersprosse eines Fensterkreuzes. Statt das Fenster zu benutzen, kann man an einer Zimmerwand eine helle Marke x anbringen, von deren Mitte ein Loth mit weissem Faden herabhängt.

2. Das Goniometer nach E. Mitscherlich (vgl. weiter unten bei Spektrometer).

Uebung. Messung von Winkeln mit dem Wollaston'schen Goniometer.

Uebung. 1) Man stellt das Goniometer so auf, dass die durch

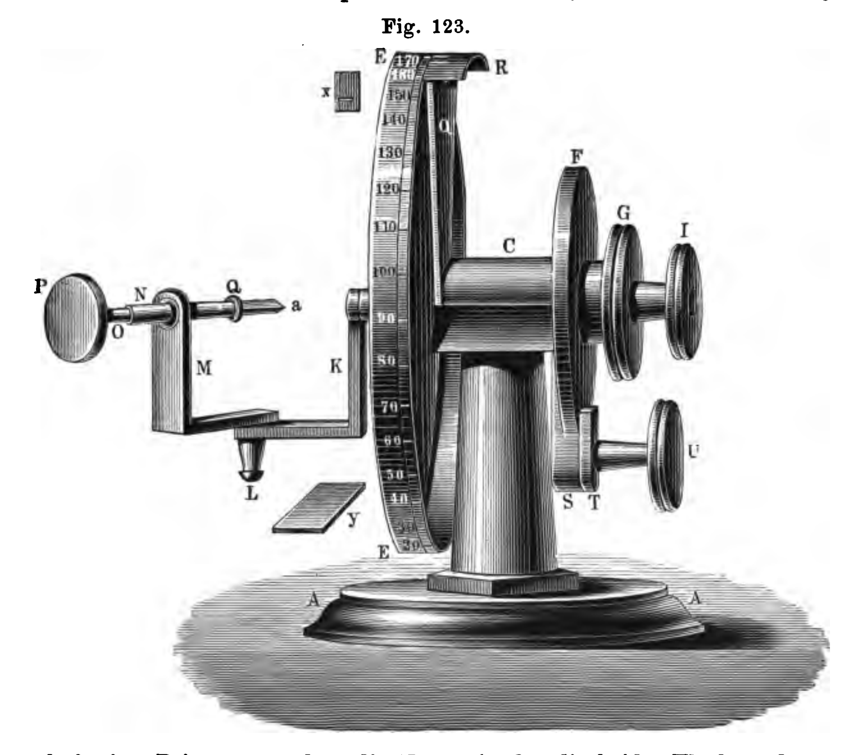
[1]) Die bei manchen Reflexionsgoniometern, wie bei dem hier abgebildeten, getroffene Einrichtung FST dient zu Repetitionsmessungen.

die Marke oder die Mitte des Fensterkreuzes gehende und zu diesem senkrecht stehende Verticalebene zu der Scheibe EE parallel ist.

2) Auf dem Tische befestigt man mit etwas Klebwachs unmittelbar vor dem Apparate ein Stück schwarzen Glases y, dessen Normale in der Ebene EE liegt.

3) Man stellt die Scheibe F fest, dreht den Arm M um den Punkt L, bis die Axe OQ in die Verlängerung der Axe C fällt (bis beim Drehen an I der Knopf P nicht schleudert), und richtet das an Q

Fig. 123.



befestigte Prisma a so, dass die Kante, in der die beiden Flächen, deren Winkel man bestimmen will, zusammenstossen, der Drehungsaxe angenähert parallel ist.

4) Man bringt das Auge dem Prisma ziemlich nahe, sucht unter Drehen an G das von einer Prismenfläche reflectirte Bild der Fenstersprosse resp. der Marke x, und neigt die Glasplatte y so, dass man in ihr das Spiegelbild derselben Sprosse resp. der Marke neben der auf der Prismenfläche gesehenen erblickt, wobei man in dem Bilde auf die Entfernung der verticalen Fenstersprosse resp. des Lothes von dem Rande der Prismenfläche achtet.

5) Man dreht das Prisma, bis man das von der anderen Prismenfläche reflectirte Bild derselben Fenstersprosse oder der Marke neben

dem Spiegelbilde in y sieht. Dabei soll das Bild der verticalen Sprosse oder des Lothes an derselben Stelle wie vorhin liegen. Ist dies nicht der Fall, so liegt die Kante der Axe noch nicht parallel. Man führt dies durch Neigen des Prismas und einiges Hin- und Herdrehen herbei.

Fig. 124.

6) Man bringt die Bilder in der einen Prismenfläche und in dem Spiegel y genau in gegenseitige Verlängerung und liest die Stellung der Scheibe am Nonius ab; A_1.

7) Man wiederholt die Einstellung für die andere Prismenfläche, wobei man darauf achtet, ob man durch die Nulllage der Theilung hindurchgehen muss, und liest die zweite Stellung A_2 ab.

8) Man verfährt ebenso mit einem Spaltungsstück von Kalkspath.

Berechnung. Die Grösse der Drehung ist $\alpha' = A_1 - A_2$, wobei zu berücksichtigen ist, in welchem Sinne gedreht worden ist. Der gesuchte Winkel ist dann $\alpha = 180 - \alpha'$.

Beispiel: Spaltungsstück von isländischem Doppelspath (Fig. 124): $A_1 = 126^0\,29'$; gedreht wurde im Sinne der abnehmenden Bezifferung. $A_2 = 51^0\,45'$, also $\alpha' = 74^0\,44'$ und $\alpha = 105^0\,16'$. Für den Winkel β an der Kante, welchen die der ersten Fläche gegenüberliegende Fläche mit der dazwischen liegenden bildet, wurde bei gleichsinniger Drehung gefunden: $A_3 = 126^0\,27'$, einmal durch 180^0 hindurchgegangen, also $\beta' = 51^0\,45' + (180 - 126^0\,27') = 105^0\,18'$ und $\beta = 74^0\,42'$. Summe beider Winkel gleich $179^0\,58'$ statt $180^0\,0'$.

2. Hohlspiegel.

Bei gekrümmten reflectirenden Flächen gilt das gewöhnliche Reflexionsgesetz für jedes Oberflächenelement, als reflectirende Ebene gilt die Tangentialebene an dem Reflexionspunkt, als Einfallsloth die Normale auf derselben.

Bei sphärischen Spiegeln ist die gekrümmte Fläche eine Kugelfläche. Die Spiegel sind concav (Hohl- oder Sammelspiegel), wenn die Innenfläche der Kugel, convex (erhabene oder Zerstreuungsspiegel),

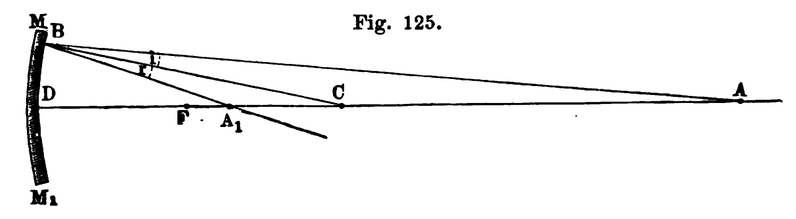


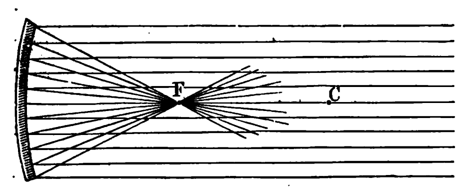
Fig. 125.

wenn die Aussenfläche als spiegelnde Fläche dient. Das Einfallsloth hat die Richtung des Radius.

Ist C (Fig. 125) der Mittelpunkt derjenigen Kugel, von deren Oberfläche der Hohlspiegel MM_1 ein Stück ist, so ist $CD = CB = r$ ein Radius; die Strahlen, die von einem in A in der Entfernung $AD = a$ vom Spiegel gelegenen Gegenstande (Gegenstandsweite) auf den Spiegel fallen, z. B. der Strahl AB, werden so reflectirt, dass Winkel $i = r$ ist.

Der durch den Mittelpunkt gehende, senkrecht auf den Spiegel fallende Strahl AD wird in sich selbst zurückgeworfen; die reflectirten Strahlen schneiden sich in A_1 in der Entfernung $DA_1 = b$ vor dem Spiegel; hier entsteht also ein Bild, und zwar ein reelles des Gegenstandes (b = Bildweite). Liegt umgekehrt der Gegenstand in A_1, so entsteht das Bild in A. Treffen die Strahlen parallel auf den Spiegel, kommen sie also aus sehr grosser Entfernung, wie in Fig. 126, so vereinigen sie sich in dem sogenannten Brennpunkte F. Derselbe liegt halb so weit vom Spiegel, als der Mittelpunkt C von ihm entfernt ist. Seine Entfernung vom Spiegel heisst die Brenn- oder Focalweite φ, also $\varphi = {}^1/_2\, r$.

Fig. 126.



Zwischen Gegenstandsweite a, Bildweite b und Brennweite φ besteht die Beziehung:

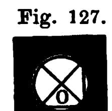
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{\varphi}.$$

Ist z. B. $a = r$, liegt also der Gegenstand in C, so ist $b = r$, d. h. das Bild entsteht in der gleichen Entfernung vom Spiegel, wie der Gegenstand von demselben absteht, d. h. im Mittelpunkte.

Ferner gilt der Satz: Die Bildgrösse verhält sich zur Gegenstandsgrösse wie die Bildweite zur Gegenstandsweite.

Apparat. Auf die Träger der optischen Bank (vergl. S. 221) werden gesetzt: 1. ein sphärischer Hohlspiegel; 2. eine Gaslampe mit Eisenblechcylinder, der in der Höhe der Flamme auf der einen Seite eine 1 cm weite runde Oeffnung O trägt, über welche Drähte gespannt sind (Fig. 127). Ein zweiter Cylinder hat in derselben Höhe eine sehr kleine Oeffnung. An die Cylinder sind horizontale Arme angenietet, von denen Senkel herabhängen, die auf der Theilung der optischen Bank die Lage der Oeffnungen anzeigen. Die Lampe steckt in einem horizontalen, circa 8 cm langen Arme und wird in dem Träger so befestigt, dass sie seitlich neben der Mittellinie der optischen Bank steht. 3. Ein grosser Papierschirm oder eine kleine matte Glastafel.

Fig. 127.



1. Prüfung der Gesetze des Hohlspiegels.

Uebung. 1) Man misst den Durchmesser d der Oeffnung O in dem Eisenblechcylinder.

2) Man stellt die Lampe vor dem Hohlspiegel etwas seitlich von der optischen Bank auf, in einiger Entfernung die matte Glasplatte und den Hohlspiegel hinter dieselbe in einer solchen Entfernung, dass auf der matten Glasplatte ein scharfes verkleinertes Bild der Oeffnung entsteht. Die von der Oeffnung kommenden Strahlen gehen an der Glasplatte vorbei, fallen auf den Hohlspiegel und werden auf der Glas-

platte vereinigt. Hier durchkreuzen sie sich, es entsteht ein reelles und zwar ein umgekehrtes Bild.

3) Man liest an den Indices I der Träger (S. 221) die Stellung von Gegenstand (Oeffnung im Cylinder), Spiegel und Bild, G, S, B, ab und misst den Durchmesser des Bildes D.

4) Man wiederholt den Versuch für einige Stellungen des Spiegels, bei denen das verkleinerte Bild zwischen Gegenstand und Spiegel fällt.

5) Man nimmt die matte Glastafel aus ihrem Träger, befestigt sie neben der Oeffnung O und verschiebt den Spiegel so lange, bis auf ihr ein scharfes Bild entsteht; sind G' ($= B'$) und S' die entsprechenden Stellungen der Indices, so ist $G' - S' = B' - S' = r$ der Krümmungsradius des Spiegels, $\varphi = \frac{1}{2} r$ seine Brennweite.

6) Man schiebt den Spiegel noch näher an den Gegenstand heran: das Bild entsteht jetzt hinter dem Gegenstande und ist vergrössert. Man fängt es auf dem grossen Papierschirm auf, misst seine Grösse D und liest die Indicesstellungen G, S und B wie vorher ab.

7) Man rückt den Spiegel bis auf Brennweitenentfernung an den Gegenstand. Das Bild vergrössert sich immer mehr und rückt in immer weitere Abstände, zuletzt verschwindet es ganz und der Schirm ist gleichförmig erhellt.

7a) Man schiebt über die Lampe den Eisenblechcylinder mit der kleinen Oeffnung und stellt den Spiegel so, dass sich die Oeffnung in dem Brennpunkte befindet, dann ist auf dem Schirme ein Kreis erhellt, dessen Durchmesser gleich dem der Oeffnung des Hohlspiegels ist; er ändert seine Grösse bei Annäherung und Entfernung des Schirmes nicht. Die von dem Spiegel reflectirten Strahlen sind unter einander parallel.

8) Man schiebt den Spiegel noch näher an den leuchtenden Punkt, der Schirm bleibt gleichförmig erhellt, aber der erleuchtete Kreis ist grösser, als die Oeffnung des Spiegels und wird um so grösser, je weiter man den Schirm entfernt; ein reelles Bild entsteht nicht. Die Strahlen werden so vom Hohlspiegel zurückgeworfen, als kämen sie von einem hinter dem Spiegel gelegenen Punkte. Blickt man in den Spiegel, so sieht man hinter ihm ein Bild des Gegenstandes; dasselbe ist also virtuell, es steht aufrecht.

9) Man bestimmt den Krümmungsradius mit dem Sphärometer (vergl. S. 20), wobei man für r einen negativen Werth erhält.

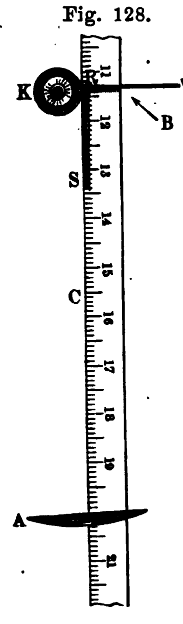
Berechnung. Man berechnet aus den gefundenen Stellungen: 1) Die Gegenstandsweiten $a = G - S$ (bezw. $S - G$); 2) die Bildweiten $b = B - S$ (bezw. $S - B$) und überzeugt sich, dass $1/a + 1/b$ nahezu constant $= c$ ist; die Brennweite φ ist dann $1/c$, der Krümmungsradius $r = 2\varphi$; 3) das Verhältniss von $b:a$. Dann ist das Verhältniss der Bildgrösse D zur Gegenstandsgrösse d nahe gleich $b:a$.

2) Bestimmung der Brennweite eines Augenspiegels.

Zur Beleuchtung bei der Untersuchung des Augenhintergrundes,

der Nase, des Kehlkopfes etc. dienen Hohlspiegel (Augen-, Nasen-, Kehlkopfspiegel), welche in der Mitte durchbohrt sind. Die von einer Lampe, welche seitlich neben dem Kopfe des zu Untersuchenden steht, kommenden Strahlen werden durch den Hohlspiegel auf die zu untersuchende Stelle geworfen, während gleichzeitig der Untersuchende durch die Spiegelöffnung blickt und auf die erleuchteten Stellen, eventuell durch Linsen unterstützt, accommodirt. Die Brennweite des Hohlspiegels muss je nach den Verhältnissen eine verschiedene sein; sie wird in folgender Weise bestimmt.

Fig. 128.



Uebung. 1) Ein Blatt weissen Cartonpapieres V (Fig. 128) wird rechtwinkelig umgebogen und vertical so neben der Flamme einer Kerze K befestigt, dass die Ebene der einen Hälfte VR gerade durch die Mitte der Flamme geht, die andere RS zwischen der ersten Hälfte und der Flamme als beschattende Zwischenwand steht.

2) Man hält den Hohlspiegel A so vor die Karte, dass auf derselben bei B ein deutliches Bild der Flamme entsteht, das dann dieselbe Grösse wie die Flamme selbst hat. Man misst die Entfernung C des Spiegels von der Papierfläche.

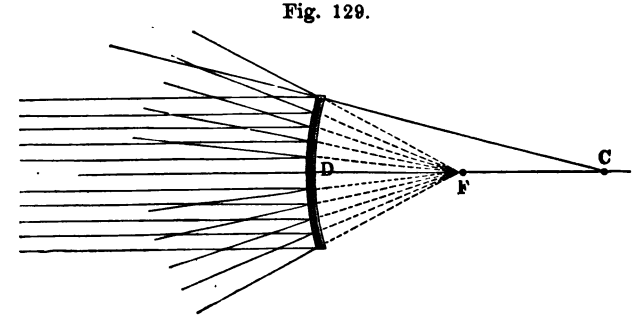
Dann ist nach S. 230 der Abstand von Spiegel und Flamme gleich dem Radius, die Brennweite ist also:

$$\varphi = {}^1/_2\, C.$$

3. Convexspiegel.

Convexspiegel (vergl. S. 229) liefern virtuelle Bilder. Fallen auf einen Convexspiegel parallele Strahlen, Fig. 129, so werden sie reflectirt

Fig. 129.



(zerstreut), als kämen sie von einem Punkte F, der um den halben Radius $DC = r$ hinter dem Spiegel liegt. Seine Entfernung $DF = \varphi = {}^1/_2 r$ heisst die Zerstreuungsweite des Spiegels.

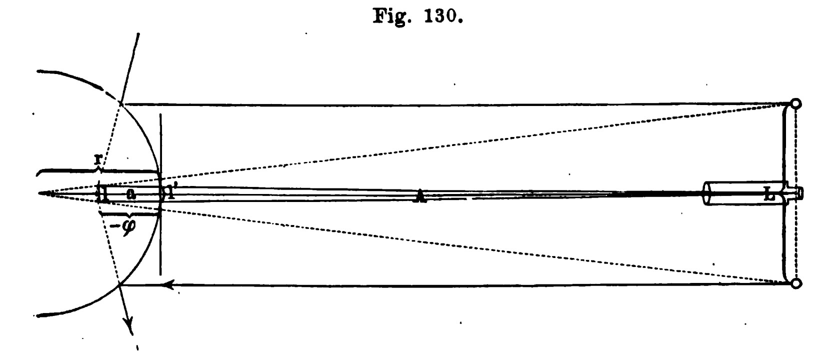
Zwischen Gegenstandsweite A, Bildweite a und Zerstreuungsweite φ besteht die Beziehung:

$$\frac{1}{A} + \frac{1}{-a} = \frac{1}{-\varphi}.$$

Bestimmung des Radius r eines Convexspiegels.

Princip. Die von einem Gegenstande L (Gegenstandsgrösse) (Fig. 130), der in der Entfernung A vor dem Spiegel steht, vom Spiegel reflectirten Strahlen verlaufen so, als ob sie von einem Gegenstande l

Fig. 130.



kämen, der in der Entfernung a hinter dem Spiegel liegt. Einem von L her gegen den Spiegel blickenden Auge erscheint das Bild des Gegenstandes also in der Grösse l' auf einer Scala, die den Spiegel bei l' berührt. Zwischen r, l', L und A besteht die Beziehung:

$$r = \frac{2\,l'\,A}{L - 2\,l'}.$$

Uebung. 1) Man stellt ein Ablesefernrohr mit seiner Scala in hinreichend grosser Entfernung A vor dem Convexspiegel auf und stellt an die Enden der Scala je ein Licht, deren Entfernung L von einander die Gegenstandsgrösse darstellt.

2) Man richtet das Fernrohr auf die Bilder der Lichter in dem Spiegel.

3) Man befestigt vor dem Spiegel in horizontaler Richtung eine Scala so, dass man im Fernrohr die Spitzen der Lichterbilder gerade bis zur Scala reichen sieht.

4) Man liest den Abstand l' der Bilder auf der Scala durch das Fernrohr ab.

Aus den gemessenen Grössen ergiebt sich r nach der Formel.

Beispiel: $l' = 3$, $L = 56$, $A = 500$ cm. Daraus ergiebt sich $r = 60$ cm.

Bemerkung. Diese Methode liegt der in der Ophthalmologie benutzten Bestimmung der Krümmung der Hornhaut zu Grunde.

III. Bestimmung des Brechungsindex.

Einleitung.

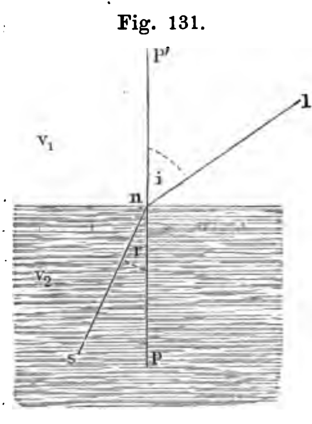
I. Brechungsgesetz.

Fällt ein Lichtstrahl auf die Trennungsfläche zweier Medien, etwa Luft und Wasser, so wird der in das zweite Medium eindringende Strahl stets abgelenkt, wenn er nicht gerade senkrecht auf die Fläche auftrifft (Krystalle ausser den dem regulären System angehörigen schliessen wir hier von der Betrachtung aus): der Strahl wird gebrochen.

Für die Brechung gilt das Gesetz von Snell bezw. Descartes:

1. Einfallender Strahl, Einfallsloth und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene; 2. das Verhältniss n des Sinus des Einfallswinkels (i) zu dem Sinus des Brechungswinkels (r) ist constant, d. h. unabhängig von der Grösse des Einfallswinkels (Fig. 131). Dieses Verhältniss heisst Brechungs-Verhältniss oder -Index oder -Exponent[1]).

Fig. 131.



Der Brechungsindex hat neben dieser geometrischen folgende physikalische Bedeutung, aus der sich erstere ergiebt: der Brechungsindex ist gleich dem Verhältniss der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten v_1 und v_2 des Lichtes in beiden Medien:

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Ist das erste Medium das Vacuum und setzt man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in demselben gleich eins, ist also $v_1 = 1$, so ist der reciproke Werth des Brechungsindex $1/n = v_2$ gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in dem zweiten Medium. Wird der gebrochene Strahl zu dem Einfallsloth hin gebrochen, wie in der Figur, so heisst das zweite Medium das optisch dichtere, das erste das optisch dünnere. In dem optisch dichteren Medium ist die Fortpflanzungs-

[1]) Ueber Sinus, Cosinus etc. vergl. die Tabellen am Schlusse des Buches.

geschwindigkeit kleiner als in dem optisch dünneren. Grössere optische Dichte entspricht aber nicht immer einer grösseren mechanischen Dichte.

Für den Brechungsindex N beim Uebergange aus dem Medium 2 in das Medium 1 finden wir

$$N = \frac{\sin r}{\sin i} \dots = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{n};$$

der Brechungsindex beim Uebergange aus einem Medium 2 in ein Medium 1 ist der reciproke Werth desjenigen für den Uebergang aus dem Medium 1 in das Medium 2.

Sind n_{12}, n_{13}, n_{23} die Brechungsindices für den Uebergang aus einem Medium 1 in ein Medium 2, aus dem Medium 1 in ein Medium 3, und aus dem Medium 2 in das Medium 3, so ist

$$n_{23} = n_{13}/n_{12} \quad \text{und} \quad n_{13} = n_{12} . n_{23}.$$

Meist ist das erste Medium Luft und man bezieht den Brechungsindex auf diese. Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten im Vacuum und in der Luft sehr nahe gleich sind (bei Luft von 760 mm Druck und 0^0 ist ihr Verhältniss 1,000290), so genügt es für die meisten Zwecke, den auf Luft bezogenen Index zu betrachten. Der Brechungsindex ändert sich mit der Wellenlänge des untersuchten Lichtes.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und damit der Brechungsindex spielen eine wichtige Rolle bei der Betrachtung der optischen Eigenschaften der Körper, denn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Wellenbewegung in einem Medium hängt von dessen Beschaffenheit ab und kann uns umgekehrt Aufschluss über die letztere geben.

II. Brechungsindex und Wellenlänge.

Für die Abhängigkeit der Brechungsindices n_λ von der Wellenlänge ist eine grosse Anzahl von Formeln aufgestellt worden, von denen wir nur die von Cauchy für schwach dispergirende, durchsichtige Körper anführen:

$$n_\lambda = A + \frac{B}{\lambda^2}.$$

Dabei sind A und B Constanten, und zwar ist A der der unendlich grossen Wellenlänge ($\lambda = \infty$) entsprechende Brechungsindex, wie er aus der Formel berechnet werden kann; denn ist $\lambda = \infty$, so ist $B/\lambda^2 = 0$, also

$$n_\infty = A.$$

Sind die Brechungsindices n_1 und n_2 für zwei Wellenlängen λ_1 und λ_2 gefunden, so kann man A und B berechnen. Es ist

$$n_1 = A + \frac{B}{\lambda_1^2} \qquad n_2 = A + \frac{B}{\lambda_2^2}$$

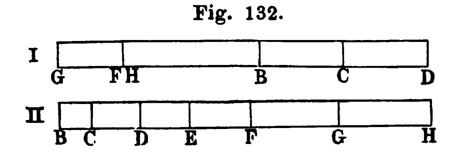
$$A = \frac{(n_1 \lambda_1^2 - n_2 \lambda_2^2)}{(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)}.$$

Setzen wir diesen Werth von A in die Gleichung für n_1 ein, so erhalten wir:

$$B = (n_1 - A)\,\lambda_1^2.$$

Der Brechungsindex wächst bei durchsichtigen Körpern vom Roth zum Blau, d. h. mit abnehmender Wellenlänge. Stark absorbirende Körper zeigen oft ein anderes Verhalten; bei einigen nimmt der Brechungsindex vom Roth zum Violett regelmässig ab, bei anderen vom Roth zum Grün zu und dann nach dem Violett ab; solche Körper heissen anormal dispergirende.

Fig. 132.



Die Vertheilung der Fraunhofer'schen Linien in einem Spectrum, das I. von einem Prisma aus anormal dispergirender Fuchsinlösung und II. von einem normal dispergirenden Glasprisma entworfen ist, veranschaulicht Fig. 132.

III. Brechungsindex und Dichte.

Ist für eine Substanz n der Brechungsindex, A die Constante der Cauchy'schen Formel, d die Dichte, so ist, wenn sich Brechungsindex und Dichte in Folge von Druck- oder Temperaturänderungen ändern, nach Gladstone das specifische Brechungsvermögen:

$$\frac{n-1}{d} = \varrho_n \quad \text{oder} \quad \frac{A-1}{d} = \varrho_A,$$

wo ϱ_n und ϱ_A Constanten bedeuten. An Stelle der Relationen von Gladstone haben Lorenz und Lorentz die folgenden gesetzt:

$$\frac{n^2-1}{n^2+2}\cdot\frac{1}{d} = \varrho_{n^2} \quad \text{oder} \quad \frac{A^2-1}{A^2+2}\cdot\frac{1}{d} = \varrho_{A^2},$$

wo ϱ_{n^2} und ϱ_{A^2} Constanten bedeuten. Nach Ketteler soll statt der 2 im Nenner eine Grösse x stehen, die bei verschiedenen Körpern verschiedene Werthe annimmt.

IV. Brechungsindex von Gemischen.

Sind die Brechungsindices der ungemischten Körper $n_1, n_2, n_3 \ldots$, ihre Dichten $d_1, d_2, d_3 \ldots$, die in einem Gewichte P der Mischung enthaltenen Gewichte derselben $p_1, p_2, p_3 \ldots$, ist N der Brechungsindex der Mischung, D ihre Dichte, so ist

$$\frac{N-1}{D}P = \frac{n_1-1}{d_1}p_1 + \frac{n_2-1}{d_2}p_2 + \frac{n_3-1}{d_3}p_3 + \cdots$$

oder

$$\varrho_N P = \varrho_{n_1}p_1 + \varrho_{n_2}p_2 + \varrho_{n_3}p_3 + \cdots$$

Eine ganz analoge Gleichung erhält man, wenn man statt ϱ_n die Ausdrücke ϱ_{n^2} zu Grunde legt.

Für eine Lösung von p_1 Theilen Salz in 100 Theilen Flüssigkeit oder ein Gemisch von p_1 Theilen einer Substanz mit $(100 - p_1)$ Theilen einer anderen ist:

$$\varrho_N \cdot 100 = \varrho_{n_1} p_1 + \varrho_{n_2} (100 - p_1),$$

oder

$$\varrho_{N^2} \cdot 100 = \varrho_{n_1^2} \cdot p_1 + \varrho_{n_2^2} \cdot (100 - p_1).$$

Kennt man N, n_1, n_2, D, d_1, d_2, resp. ϱ_N, ϱ_{n_1}, ϱ_{n_2} etc., so kann man p_1 berechnen, man kann also auf diese Weise eine optische Analyse ausführen. Kennt man umgekehrt für eine Lösung eines Salzes N, D, n_2, p_1, d_2, so kann man ϱ_{n_1} für das Salz berechnen, und wenn auch d_1 bekannt ist, n_1 finden.

V. Brechungsindex und chemische Zusammensetzung. Molecularrefraction.

Für Verbindungen kann man ganz analoge Ausdrücke ableiten, wie für Mischungen. Das Moleculargewicht eines aus a Atomen des Elementes A, dessen Atomgewicht A sei, b Atomen des Elementes B etc. zusammengesetzten Körpers $M = A_a B_b C_c \ldots S_s$ denkt man sich als eine Mischung von aA gr von A, bB gr von B; ist dann n der Brechungsindex des untersuchten Körpers, d seine Dichte, sind α, β,... die specifischen Brechungsvermögen der Körper A, B, C... in dem Zustande, in dem sie in die Verbindung eintreten, so ist:

$$R = M\varrho_n = aA\alpha + bB\beta + \cdots sS\sigma$$

das moleculare Refractionsvermögen oder die moleculare Refraction oder das Refractionsäquivalent.

Bezeichnet man analog $r_a = A\alpha$, $r_b = B\beta$,... als Atomrefraction, so ist die Molecularrefraction der Verbindung $A_a B_b C_c D_d \ldots S_s$:

$$R_N = M\varrho_n = ar_a + br_b + \cdots + sr_s.$$

Ganz analoge Ausdrücke würden sich bei Zugrundelegung von ϱ_{n^2} statt ϱ_n ergeben.

Die Molecularrefraction ist also, wenn diese Relation sich bestätigt, gleich der Summe der Atomrefractionen, sie ist eine additive Eigenschaft.

1. Vorübung.

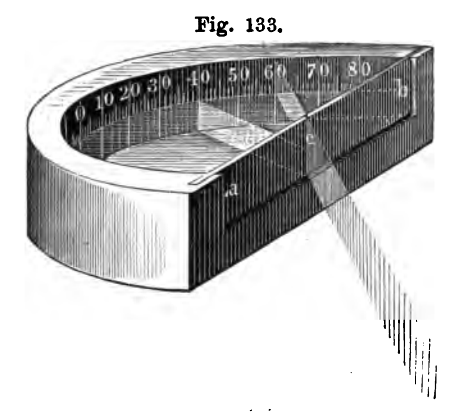
I. Bestimmung des Brechungsindex mit einem halbkreisförmigen Flüssigkeitstrog.

Gebraucht wird: Halbkreisförmiges Gefäss mit Theilung; Wasser und Terpentinöl; Argandbrenner; Holzstab.

Apparat (Fig. 133, a. f. S.). Ein ca. 10 cm hohes Gefäss ist auf der einen Seite durch eine ebene Glasfläche ab, auf der anderen Seite durch eine halbkreisförmige, verticale Wand begrenzt. Erstere ist bis auf einen schmalen, verticalen Spalt in ihrer Mitte bei c undurchsichtig.

Auf dem Halbkreise ist eine Gradtheilung angebracht. Sie beginnt da, wo das auf *ab* in *c* errichtete Loth, d. h. das Einfallsloth, die Kreisfläche schneidet. Der Trog wird zur Hälfte mit Flüssigkeit gefüllt. Der Gradstrich, auf welchen der oberhalb der Flüssigkeit durch den Spalt gehende Strahl trifft, giebt den Einfallswinkel, derjenige, auf welchen der durch die Flüssigkeit gehende gelangt, den Brechungswinkel. Die Richtung des Einfallslothes bezeichnet man durch einen auf den Trog in der Richtung 0*c* gelegten Stab.

Fig. 133.



Uebung. 1) Man füllt den Trog mit Wasser, stellt eine Gaslampe in einiger Entfernung von dem Spalt *c* so auf, dass die Flammenmitte in der Höhe des Wasserspiegels steht und neigt den Trog durch Drehen um eine verticale Linie, die durch den Spalt *c* geht, um verschiedene Winkel gegen den einfallenden Strahl.

2) Man liest die zusammengehörigen Einfallswinkel i, i_1, i_2 und Brechungswinkel r, r_1, r_2 ab und sucht deren Sinus in der Tafel der trigonometrischen Functionen (Tab. a. Schluss d. Buches) auf; dann ist

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin i_1}{\sin r_1} = \cdots$$

3) Derselbe Versuch wird, nach sorgfältigem Austrocknen des Troges, mit Terpentinöl [1]) angestellt.

Beispiel: Für Wasser wurde gefunden:

$i =$	20	35	50	64
$r =$	15	25	35	42
$n = \sin i/\sin r =$	1,32	1,36	1,33	1,34

Aus den Versuchen mit Wasser $n = 1{,}33$ und Terpentinöl $n = 1{,}50$ folgt, dass die optisch dichteren Medien nicht ein grösseres specifisches Gewicht haben, denn Terpentinöl hat einen grösseren Brechungsindex als Wasser, aber eine kleinere Dichte als letzteres.

II. Bestimmung der Brechungsindices mittelst eines Spectrometermodells.

Gebraucht wird: Spectrometermodell; Glasprisma von 60^0, Hohlprisma mit Schwefelkohlenstoff; Argandbrenner, Bunsenbrenner; Chlorlithium, -natrium, -strontium; drei Platinbleche an Platindrähten, Stativ dazu. (Um

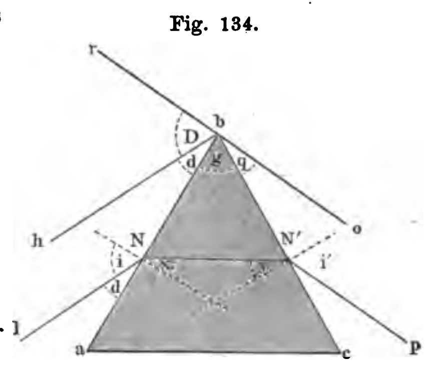
[1]) Sollte das Terpentinöl bei ungenügendem Trocknen des Troges durch suspendirte Wassertröpfchen getrübt sein, so filtrirt man es durch Filtrirpapier.

stets die Platinbleche etc. zusammen zu haben, sind in ein Holzbrett drei Löcher gebohrt für die die Salze enthaltenden Pulvergläser, dahinter drei kleinere Löcher für Reagirgläser, in welche die Platinbleche mit den sie tragenden Glasröhren gesteckt werden, zwei Löcher, in welche der Bunsenbrenner und das Stativ für die Platinbleche passen.) Eine vollkommen und eine unvollkommen planparallele Glasplatte.

Princip. Prismen sind von zwei ebenen, sich in einer geraden Linie schneidenden Flächen begrenzte Körper; der Prismenwinkel oder hier speciell der brechende Winkel ist der Winkel, in dem sich die beiden Flächen schneiden.

Fällt ein Lichtstrahl in der Richtung lN, Fig. 134, auf die Vorderfläche eines Prismas, so tritt er in einer Richtung $N'p$ aus demselben aus. Er erfährt also durch das Prisma eine Ablenkung um den Winkel D, der gebildet wird durch die lN und $N'p$ parallelen Linien hb und ro. Diese Ablenkung setzt sich zusammen aus derjenigen beim Eintritt in das Prisma und derjenigen beim Austritt aus demselben. Die erste hängt ab von dem Einfallswinkel i und dem Brechungsindex n, welche zusammen den Winkel x (Brechungswinkel) bestimmen; die zweite von dem Winkel y und dem Brechungsindex, welche den Austrittswinkel i' bestimmen; y selbst ist aber abhängig von x und der Neigung der zweiten Fläche des Prismas gegen die erste, d. h. dem brechenden Winkel g, so dass also D abhängt von i, n und g.

Fig. 134.



Ein Minimum der Ablenkung (s. w. u.) tritt ein, wenn der Austrittswinkel i' gleich dem Einfallswinkel i ist; dann durchsetzt der Strahl das Prisma symmetrisch, wie die obige Figur zeigt; i ist dann durch n und g bestimmt, kann also in der Gleichung für die Ablenkung durch diese Grössen ersetzt werden. In diesem Falle ist

$$n = \frac{\sin {}^1/_2\,(g + D)}{\sin {}^1/_2\, g}.$$

Zur Bestimmung des Brechungsindex n muss man also 1) den brechenden Winkel g und 2) das Minimum der Ablenkung D bestimmen [1]).

---

[1]) Stellt man nicht auf das Minimum ein, so muss man auch den Einfallswinkel an der ersten Fläche des Prismas messen und findet folgende Gleichungen, wenn i der Einfallswinkel an der ersten Prismenfläche, r der Austrittswinkel an der zweiten ist und I und R die zu i und r zugehörigen Winkel im Prisma sind (Ed. Ketteler, Beobachtungen über die Farbenzerstreuung der Gase. Bonn, A. Henry, 1865):

Apparat. Wir benutzen zu den Versuchen ein dreiseitiges Prisma aus Glas; die der brechenden Kante b gegenüberliegende Fläche desselben ist geschwärzt, um störende Lichtreflexe abzuschwächen.

Um ein Flüssigkeitsprisma herzustellen, bringt man die Flüssigkeit in sogenannte Hohlprismen. Ein Glasprisma A, Fig. 135, ist mit einer Durchbohrung mn versehen, von der bei c eine Oeffnung nach oben führt, in die man ein Thermometer einsetzen kann. Die seitlichen Oeffnungen von m und n werden mit planparallelen Glasplatten α und β verschlossen, die die Lichtstrahlen nicht ablenken, sondern nur sich selbst parallel verschieben; sie werden durch die Federn a und a festgehalten. Der so entstehende Hohlraum wird mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt. Untersucht man mehrere Flüssigkeiten nach einander, so wird er stets dazwischen durch Ausspülen mit Wasser, Alkohol und Aether, oder mit den letzteren beiden allein gereinigt und durch Durchsaugen von Luft getrocknet. Das ganze Hohlprisma wird in einem kleinen dreieckigen Blechuntersatz, mit etwa 5 mm hohen Rändern, auf das Tischchen des Spectrometers gesetzt, damit zwischen den Glasplatten durchsickernde Flüssigkeit nicht auf das Spectrometer gelangt. Die Glasflächen α und β der Glasplatten werden sorgfältig abgewischt, da sonst das Bild verwaschen erscheint.

Fig. 135.

Um die Richtung der einfallenden und gebrochenen Strahlen zu bestimmen, werden die Prismen auf ein Spectrometer gestellt; wir lassen die Uebungen zunächst mit einem Modell eines solchen anstellen. Dasselbe ist einem von Weinhold angegebenen nachgebildet.

Eine runde Xylolithplatte T, Fig. 136 (57 cm Durchmesser, 3,0 cm Dicke), ist an ihrem abgeschrägten Rande mit einer Kreistheilung versehen (die einzelnen Gradstriche stehen ca. 0,5 cm von einander ab, so dass man noch $^1/_{10}{}^0$ oder $6'$ gut schätzen kann). In der Mitte von T ist ein kleiner, runder Tisch t von 12 cm Durchmesser angebracht, auf den man eventuell noch ein durch drei Stellschrauben verstellbares

---

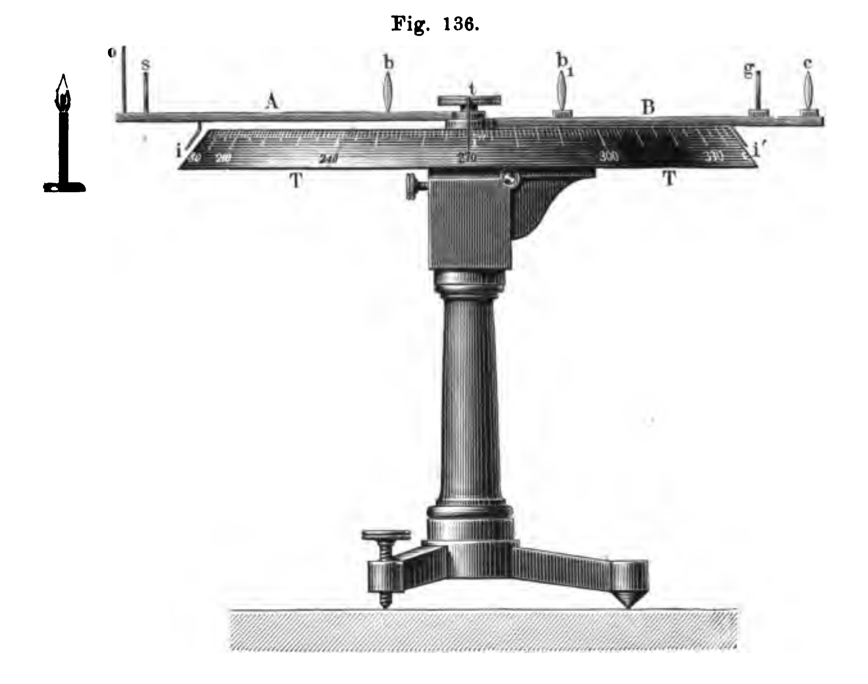
1) $n = \frac{\sin {}^1/_2 (i + r)}{\sin {}^1/_2 g} \cdot \frac{\cos {}^1/_2 (i - r)}{\cos {}^1/_2 (I - R)}$, wo 2) $g + D = i + r$,

3) $\operatorname{tang} {}^1/_2 (I - R) = \frac{\operatorname{tang} {}^1/_2 (i - r)}{\operatorname{tang} {}^1/_2 (i + r)} \operatorname{tang} {}^1/_2 g$.

Man bestimmt g, D, wie unten angegeben ist, i dadurch, dass man erst auf den Spalt einstellt (Ablesung μ), dann auf den an der Eintrittsfläche reflectirten Strahl (Ablesung ν), dann ist $i = 90 - {}^1/_2 (\mu - \nu)$; aus g, D und i ergiebt sich aus 2) r, also auch $i - r$ und $i + r$, dann folgt aus 3) $I - R$ und endlich aus 1) n. Sobald $i = r$, wird $I = R$, und n nimmt den oben angegebenen Werth an, das Prisma steht dann im Minimum der Ablenkung.

Tischchen stellen kann. Um die Axe des Tisches lassen sich die ca. 50 cm langen Holzschienen *A* und *B* drehen; beide haben Zeiger *i* und *i'*, die sich auf der Theilung bewegen. In *A* und *B* sind Nuthen eingeschnitten, in denen sich Holzschieber verschieben, auf welchen die optischen Theile des Apparates befestigt sind. Die Holzschiene *A* entspricht dem sogenannten Collimator; sie trägt einen Spalt *s* mit verstellbaren Schneiden und eine Biconvexlinse *b* mit einer Brennweite von ca. 34 cm. Die Schiene *B* entspricht dem Beobachtungsfernrohre; sie trägt eine Biconvexlinse b_1 von derselben Brennweite wie *b*, eine Fassung *g*, in die eine matte oder durchsichtige Glasplatte, auf welche je ein × mit Tusche gezeichnet ist (vergl. Fig. 137), ein-

Fig. 136.



geschoben werden kann, und endlich eine als Lupe dienende biconvexe Linse *c* von 5 cm Brennweite, das Ocular. Die Striche auf den Glasplatten vertreten das Fadenkreuz der feineren Messinstrumente; wir nennen das Strichkreuz auch hier „Fadenkreuz". Der Tisch *t* ist mit einem Arm mit einem auf der Theilung spielenden Index *i''* verbunden. An dem Ende des Collimatorfernrohres ist mittelst eines Schiebers ein Schirm *o* mit Oeffnung zur Abhaltung von Nebenlicht eingeschoben.

Uebung 1. Einstellung des Apparates. 1) Man nimmt zunächst die Collimatorlinse *b* heraus und bestimmt deren Brennweite φ,

indem man den Abstand ermittelt (s. unten), in dem sie von einem weit entfernten Gegenstande ein deutliches Bild entwirft.

2) Man schiebt die Linse ein und stellt den Spalt in der Entfernung φ von der Collimatorlinse auf.

3) Man stellt eine Lampe vor das Collimatorfernrohr, dreht das Beobachtungsfernrohr, bis es gerade gegenüber dem Collimatorfernrohr steht und schiebt die durchsichtige Glasplatte mit dem Fadenkreuz so lange vor und zurück, bis das Bild des Spaltes und das Fadenkreuz möglichst scharf erscheinen, und bis beim Verschieben des Auges nach rechts und links vor dem Ocular das Fadenkreuz sich nicht gegen das Bild des Spaltes verschiebt; dann fallen beide genau in dieselbe Ebene. Das Ocular wird dabei stets so verschoben, dass man durch dasselbe das Bild scharf sieht. Auf der matten Glasplatte sieht man die Erscheinung objectiv, man sieht das Bild des Spaltes selbst; hier stellt man nur auf möglichste Schärfe ein.

Uebung 2. Prüfung einer Platte auf Planparallelität, d. h. darauf, ob ihre beiden ebenen Flächen genau parallel sind.

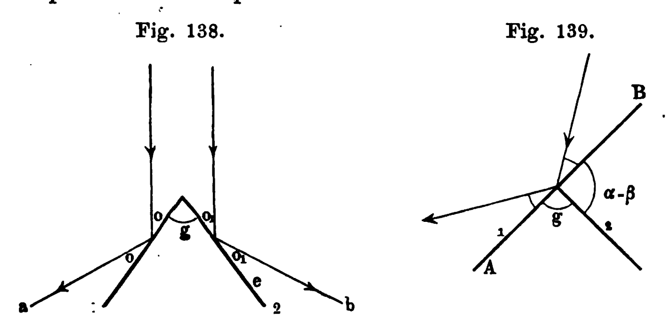
1) Man stellt das Beobachtungsfernrohr dem Collimator gegenüber und dreht dasselbe so lange, bis das verticale Bild *s* des Spaltes durch den Schnittpunkt des Fadenkreuzes geht (Fig. 137), „man stellt auf den Spalt ein".

Fig. 137.

2) Man bringt zwischen Collimator und Beobachtungsfernrohr eine Spiegelglasplatte, so dass sie die obere Hälfte der Objectivöffnungen bedeckt: Bleibt die Lage des Spaltbildes ungeändert, so ist die Platte planparallel, treten zwei Spaltbilder auf, so lenkt die Platte die Strahlen ab, sie ist schwach prismatisch.

Uebung 3. Bestimmung des Prismenwinkels. Man stellt vor den Spalt eine Gaslampe.

Fig. 138. Fig. 139.



a) Erste Methode (Fig. 138 u. Fig. 140). 1) Man stellt das Prisma so auf den Tisch *t*, dass es seine Kante den einfallenden, von *s* herkommenden Strahlen zukehrt.

2) Man dreht das Beobachtungsfernrohr *c* und bestimmt am Theil-

kreis die beiden Stellungen desselben, bei denen die Bilder, welche von den vom Spalte ausgegangenen Strahlen nach ihrer Reflexion an den Flächen 1 und 2 in dem Beobachtungsfernrohre erzeugt werden, mit dem Fadenkreuz zusammenfallen; die Stellungen seien a und b.

Der brechende Winkel ist dann $g = \frac{1}{2}(a - b)$.

Zu achten ist darauf, dass, wenn a etwa auf der anderen Seite des Nullstriches liegt wie b, $g = \frac{1}{2}(a + 360^0 - b)$; ist z. B. $a = 20^0$, $b = 260^0$, so ist $g = \frac{1}{2}(380 - 260) = 60^0$.

Fig. 140. Fig. 141. Fig. 142.

b) Zweite Methode (vgl. Fig. 139 u. Fig. 141). 1) Man stellt die beiden Fernrohre s und c gegen einander fest, so dass sie einen kleinen Winkel mit einander bilden.

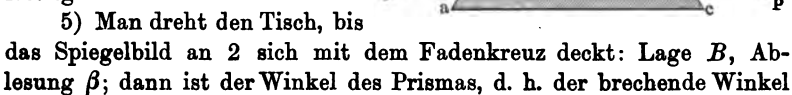
2) Man setzt den drehbaren Tisch t so auf, dass sein Zeiger sich über den Theil des Kreises hin bewegt, der nicht zwischen den beiden Fernrohren liegt.

3) Man setzt das Prisma auf den Tisch t.

4) Man dreht den Tisch, bis das Spiegelbild des Spaltes an der Fläche 1 sich mit dem Fadenkreuz deckt, und liest die Stellung des Tisches ab: Lage A, Ablesung α.

Fig. 143.

5) Man dreht den Tisch, bis das Spiegelbild an 2 sich mit dem Fadenkreuz deckt: Lage B, Ablesung β; dann ist der Winkel des Prismas, d. h. der brechende Winkel



$$g = 180 - (\alpha - \beta).$$

Uebung 4. Bestimmung der Ablenkung für beliebige Strahlen. Man beleuchtet zunächst den Spalt s durch weisses Licht.

1) Man stellt ohne Prisma das Fadenkreuz des Beobachtungsfernrohres c auf den Spalt ein, und erhält so die Richtung der ein-

16*

fallenden Strahlen lN resp. hb (Fig. 141 u. Fig. 142). Lage des Fernrohres am Theilkreis: x.

2) Man setzt das Prisma auf den Tisch t (Fig. 141) und sucht zunächst mit dem Auge das Bild des Spectrums, dann dreht man das Fernrohr an die Stelle des Auges, so dass man das Spectrum im Fernrohre sieht, und stellt das Fadenkreuz auf das Gelb.

3) Man dreht das Prisma, und zwar so, dass das Gelb nach der Lage des nicht abgelenkten Strahles hinrückt, d. h. nach der Seite hin, nach welcher die brechende Kante gelegen ist, und rückt mit dem Fernrohre nach. Das Spectrum bewegt sich bei dieser Drehung eine Zeit lang in demselben Sinne, dann scheint es eine kurze Zeit still zu stehen, darauf geht die Bewegung in die entgegengesetzte über. Bei derjenigen Stellung des Prismas, bei der der Stillstand eintritt, sind die gebrochenen Strahlen den directen am nächsten gelegen, sie haben die kleinstmögliche Ablenkung erfahren, das Prisma steht im Minimum der Ablenkung.

4) Man lässt das Prisma im Minimum der Ablenkung stehen und liest die Lage des auf Gelb eingestellten Fernrohres ab; man erhält die Richtung der abgelenkten Strahlen $N'p$ resp. ro. Lage des Fernrohres y.

Berechnung. Die Ablenkung ist $D = y - x$, denn um $y - x$ ist der einfallende Strahl durch das Prisma aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt worden. Der Brechungsindex für das Gelb ist daher:

$$n = \frac{\sin {}^1/_2 \, (D + g)}{\sin {}^1/_2 \, g}.$$

Bemerkung. Da beim Durchgange des weissen Lichtes durch ein Prisma ein Farbenband, ein „Spectrum" (vgl. S. 217), entsteht, dessen verschiedene Theile eine verschiedene Ablenkung erfahren, so besitzen die verschiedenen Farben verschiedene Brechungsindices, eine Erscheinung, die man mit dem Namen Dispersion bezeichnet.

Man muss die Indices für Strahlen von verschiedener, aber bestimmter Wellenlänge ermitteln; die blosse Angabe, dass der Brechungsindex für das Roth oder Blau bestimmt sei, genügt nicht, da jede Farbe eine grosse Anzahl von Strahlen umfasst.

Als Maass der Dispersion benutzt man den Unterschied der Brechungsindices zweier bestimmter Linien, z. B. von D und F oder A und H des Sonnenspectrums.

Uebung 5. Bestimmung der Brechungsindices für Strahlen von bestimmter Wellenlänge. Die Messungen werden mit der Natrium-, Lithium- und Strontiumflamme angestellt; man stellt dazu vor den Spalt des Spectrometers eine durch die Dämpfe der betreffenden Metalle gefärbte Bunsenflamme, indem man die Chloride derselben in einem Platinsieb in die Flamme führt (vergl. bei Spectralanalyse). Während das Licht der Natrium- und Lithiumflamme sehr lange anhält, verschwindet das der Strontiumflamme sehr schnell, man darf

daher zunächst das Platinsieb mit dem Chlorstrontium nur in den Saum der Flamme bringen und muss es dann allmählich tiefer hineinschieben (den weissen Ansatz auf dem Platin entfernt man nachher mit etwas Salzsäure).

Die Messungen werden in ganz derselben Weise durchgeführt, wie bei der eben beschriebenen Messung des Brechungsindex für Gelb.

Die Messungen sind auszuführen für ein Crownglasprisma von 60° und ein Schwefelkohlenstoffprisma von 60°. Dabei ergiebt sich ein sehr viel grösserer Brechungsindex beim Schwefelkohlenstoff, eine sehr viel grössere Gesammtdispersion desselben und ein stärkeres Anwachsen der Dispersion vom Roth nach dem Blau als beim Crownglas.

Beispiel: Glasprisma von 60°.

1) Bestimmung des brechenden Winkels nach Methode 1: $a = 234{,}9^0 = 234^0\,54'$, $b = 115^0$, $g = \frac{1}{2}(a - b) = \frac{1}{2}\,119^0\,54' = 59^0\,57'$ oder rund 60^0.

2) Bestimmung des brechenden Winkels nach Methode 2: $\alpha = 176^0$, $\beta = 56^0$, $g = 180 - (\alpha - \beta) = 60^0$.

3) Bestimmung der Ablenkung für Roth (r), Gelb (g), Violett (v): $x = 168{,}5^0 = 168^0\,30'$, $y_r = 129^0$, $y_g = 128{,}5^0 = 128^0\,30'$, $y_v = 127{,}2^0 = 127^0\,12'$, also $D_r = 39{,}5^0 = 39^0\,30'$, $D_g = 40^0$, $D_v = 41{,}3^0 = 41^0\,18'$ und $n_r = 1{,}526$, $n_g = 1{,}532$, $n_v = 1{,}547$.

2. Bestimmung des Brechungsindex mit dem Spectrometer.

Gebraucht wird: Spectrometer; Gauss'sches Ocular; Gaslampe; Glasprisma; Natriumflamme; kleines Inductorium mit zwei Tauchelementen: Geissler'sche Röhre mit Wasserstoff; Verbindungsdrähte; Hohlprisma; Benzol; Pyknometer; Waage und Gewichte; Wasser; Methyl-, Aethyl-, Amylalkohol; concentrirte Chlornatriumlösung; Acetaldehyd; Essigsäure.

Der Brechungsindex hängt von der Wellenlänge, der Dichte, also auch von der Temperatur ab; bei Gemischen von der Temperatur und Menge der in ihnen enthaltenen Componenten, bei Verbindungen von ihrer Zusammensetzung und der Art der Bindung der Atome unter einander (vgl. S. 237 u. 249).

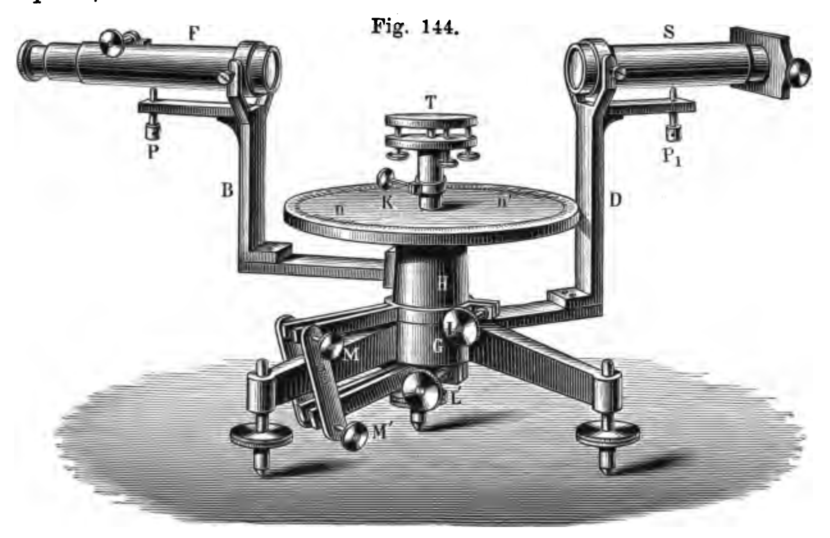
Zur Untersuchung dieser Beziehungen müssen wir die Messungen an einem genauen Spectrometer anstellen.

I. Beschreibung und Einstellung des Spectrometers.

Apparat. Das Spectrometer (Fig. 144, a. f. S.) unterscheidet sich von dem Modell durch genauere Ausführung. Spalt und Collimatorlinse einerseits, Objectiv des Beobachtungsfernrohres, Fadenkreuz und Ocular andererseits sind je zu einem Fernrohr, dem Collimator S und dem Beobachtungsfernrohr F verbunden. Das Ocular lässt sich gegen das Fadenkreuz, Fadenkreuz und Ocular zusammen gegen das Objectiv verstellen. Quer über der Mitte des Spaltes wird ein ganz dünner Platindraht befestigt, die Verbindungslinie zwischen ihm und dem Mittelpunkte der Collimatorlinse ist die Axe des Collimators. Das

Fadenkreuz wird so gestellt, dass seine Fäden unter 45⁰ gegen die Horizontale geneigt sind (Fig. 137). Die Verbindungslinie zwischen dem Schnittpunkte des Fadenkreuzes und dem Mittelpunkte des Fernrohrobjectivs ist die Axe des Beobachtungsfernrohres. Statt des gewöhnlichen Oculars kann man auch ein Gauss'sches (Fig. 145) einsetzen. Dasselbe ist an der Seite mit einer Oeffnung *b* versehen; vor dieselbe ist im Inneren des Rohres eine unter 45⁰ gegen die Axe des Fernrohres geneigte Glasplatte gestellt. Setzt man vor *b* eine Lichtquelle, so reflectirt die Platte Licht nach dem Fadenkreuz und be-

Fig. 144.



leuchtet dieses. Hat man kein Gauss'sches Ocular, so kann man das Fadenkreuz dadurch beleuchten, dass man vor der Ocularlinse eine Glasplatte unter 45⁰ befestigt und von der Seite beleuchtet, doch stören hier die vom Ocular reflectirten Strahlen.

Fadenkreuz und Spalt müssen sich im Brennpunkte der zugehörigen Linsen befinden, die Axen der Fernrohre senkrecht zur Drehungsaxe stehen, und die brechende Kante des Prismas parallel der Drehungsaxe sein.

Fig. 145.

Uebung. Einstellung des Spectrometers.

A. Einstellung des Beobachtungsfernrohres auf Unendlich.

a) Erste Methode. 1) Man stellt das Ocular scharf auf das Fadenkreuz ein. 2) Man richtet das Fernrohr auf einen entfernten Gegenstand, z. B. einen Blitzableiter, und verstellt das Ocular mit dem Fadenkreuz so lange, bis bei einer seitlichen Verschiebung des Auges Fadenkreuz und Bild des Gegenstandes unverändert ihre Lage gegen einander behalten.

b) Zweite Methode. Man stellt auf den Tisch T eine planparallele Glasplatte, setzt das Gauss'sche Ocular ein, beleuchtet das Fadenkreuz und dreht die Glasplatte um die verticale Axe so lange, bis das Bild, welches die an dem Fadenkreuz und dem Rande der dasselbe tragenden Blende vorbeigegangenen und an der Glasplatte reflectirten Strahlen von der Blende erzeugen, im Gesichtsfelde erscheint. Dann neigt man die Platte durch Drehen an den Schrauben des Tischchens T, bis das Bild des Fadenkreuzes, welches die an der Glasplatte reflectirten Strahlen erzeugen, mit diesem selbst zusammenfällt, und verstellt das Ocular mit dem Fadenkreuz so lange, bis bei Bewegungen des Auges Fadenkreuz und Bild des Fadenkreuzes unverändert ihre Lage gegen einander beibehalten.

B. Senkrechtstellung der Fernrohraxe zur Drehungsaxe.

a) Man stellt auf den Tisch eine planparallele Glasplatte, beleuchtet das Fadenkreuz und sucht das reflectirte Bild des Fadenkreuzes auf. Fallen Bild und Fadenkreuz zusammen, so steht die Axe des Fernrohres senkrecht zur Ebene der Glasplatte. Ist dies nicht der Fall, so corrigirt man die Abweichung zunächst durch Neigen der Glasplatte mittelst der Schrauben an dem Tisch T. Dann dreht man die Glasplatte um 180^0. Ist die Glasplatte parallel zu der Drehungsaxe und steht die Fernrohraxe senkrecht zu derselben, so fällt wiederum Bild und Fadenkreuz zusammen; ist dies nicht der Fall, so corrigirt man zur Hälfte an der Platte, zur Hälfte an dem Fernrohr durch Drehen an der Schraube P. Dann dreht man die Platte um 180^0 und überzeugt sich von der Coincidenz von Bild und Fadenkreuz, resp. corrigirt etwaige Abweichungen. So fährt man fort, bis vollständige Coincidenz hergestellt ist.

b) Ist die Glasplatte parallel zur Drehungsaxe, steht die Fernrohraxe senkrecht auf der Glasplatte und fällt die Drehungsaxe des Fernrohres mit der des Tisches zusammen, wie es bei guten Instrumenten sein muss, so steht nach Ausführung der obigen Einstellungen auch die Fernrohraxe senkrecht zu der Drehungsaxe desselben. Man überzeugt sich davon dadurch, dass man das Fernrohr um 180^0 dreht und untersucht, ob wiederum Coincidenz des Fadenkreuzes und seines Bildes vorhanden ist. Ist sie nicht vollkommen vorhanden, so lässt man den Tisch stehen, dreht das Fernrohr um 180^0 hin und her und neigt Glasplatte und Fernrohr so lange, bis Coincidenz eintritt. Es ist zweckmässig, zunächst die Glasplatte wenigstens angenähert nach a) richtig zu stellen.

C. Einstellung des Collimators auf Unendlich und Senkrechtstellung desselben auf die Drehungsaxe.

Man stellt das Beobachtungsfernrohr dem Collimator gegenüber auf, und zieht das den Spalt tragende Rohr so lange aus, bis das Bild des Spaltes scharf ist und bei Bewegungen des Auges sich nicht mehr

gegen das Fadenkreuz verschiebt, dann ist der Spalt in der Brennweite der Collimatorlinse.

Man neigt das Collimatorfernrohr mittelst der Schraube P_1, bis das Bild des durch den übergespannten Draht bezeichneten Mittelpunktes M des Spaltes mit dem Schnittpunkte des Fadenkreuzes zusammenfällt.

D. Prüfung einer Platte auf Planparallelität.

Uebung wie S. 242.

E. Aufstellung des Prismas, so dass die brechende Kante parallel der Drehungsaxe ist.

Man stellt das Prisma stets so auf, dass eine Fläche senkrecht auf der Verbindungslinie zweier Schrauben des Tisches T steht, da dann beim Drehen an der dritten Schraube die Fläche nur in sich selbst gedreht wird.

I. Zur Bestimmung des brechenden Winkels.

a) Methode b) S. 243. Man dreht an den den Tisch tragenden Schrauben, bis das Bild der Mitte des Spaltes M, sowohl bei der einen wie bei der anderen Stellung des Prismas mit dem Schnittpunkte des Fadenkreuzes zusammenfällt.

b) Methode a) S. 242. Man dreht an den den Tisch tragenden Schrauben, bis das Bild von M sowohl bei der einen wie bei der anderen Stellung des Fernrohres mit dem Fadenkreuz zusammenfällt.

Dies ist auch die Methode der Einstellung, wenn das Spectrometer als Goniometer nach E. Mitscherlich gebraucht werden soll (vgl. S. 227).

II. Zur Bestimmung der Ablenkung.

a) Ist der Tisch drehbar und fällt seine Drehungsaxe mit derjenigen des Fernrohres zusammen, so dreht man dasselbe mit dem nach I. a) richtig gestellten Prisma so lange, bis dasselbe im Minimum der Ablenkung steht. Man überzeugt sich, dass der zu einer das ganze Spectrum durchziehenden horizontalen Linie ausgezogene mittlere Punkt des Spaltes M durch den Schnittpunkt des Fadenkreuzes geht.

b) Will oder kann man den Tisch nicht um grosse Winkel drehen, oder fällt seine Drehungsaxe nicht mit derjenigen des Fernrohres zusammen, so stellt man das Prisma in das Minimum der Ablenkung, stellt zunächst das Fernrohr auf das von der dem Spalt zugewandten Fläche reflectirte Bild ein und neigt diese Fläche durch Drehen an den Schrauben am Tisch, bis das Bild von M und Fadenkreuz zusammenfallen, stellt dann auf das Spectrum ein und dreht an den Schrauben, bis die dunkle Horizontallinie durch das Fadenkreuz geht, dann stellt man wieder auf das reflectirte Bild ein und fährt so fort, bis in beiden Stellungen Coincidenz stattfindet.

Hieraufneigt man das Collimatorfernrohr ein klein wenig, damit nicht die schwarze Linie die Stellen des Spectrums verdeckt, auf welche das Fadenkreuz eingestellt wird.

Die Messung der Brechungsindices gestaltet sich, wie oben angegeben ist [1]).

Uebung. Brechungsindex und Wellenlänge, Dispersion. Die Messungen werden angestellt an einem Glasprisma für das gelbe Natriumlicht, die rothe und blaue Linie im Wasserstoffspectrum (über die Herstellung des Wasserstoffspectrums s. bei Spectralanalyse).

Beispiel: Für Glas: $n_{H\alpha} = 1{,}5268$, $n_{Na} = 1{,}5296$, $n_{H\beta} = 1{,}5361$. Für $H\alpha$ ist $\lambda = 656{,}3$, also $\lambda_1^2 = 4{,}307 . 10^5$, $H\beta$ ist $\lambda = 486{,}1$, also $\lambda_2^2 = 2{,}363 . 10^5$ und $\lambda_1^2 - \lambda_2^2 = 1{,}944 . 10^5$. Aus den Werthen für $n_{H\alpha}$ und $n_{H\beta}$ ergiebt sich (vergl. S. 235): $A = 1{,}5157$, $B = 4781$, daraus folgt n_{Na} ($\lambda = 598{,}3$) $= 1{,}5291$, was mit dem beobachteten Werthe nahe übereinstimmt.

Uebung. Brechungsindex und Dichte. 1) Das Hohlprisma wird mit Benzol gefüllt.

2) Der Brechungsexponent n wird für die Natriumlinie bestimmt,

3) die Dichte d mittelst des Pyknometers bestimmt.

Die Ausdrücke ϱ_n und ϱ_{n^2} (S. 236) werden berechnet.

Uebung. Brechungsindex von Gemischen. Es werden untersucht: 1) Wasser, 2) concentrirte Chlornatriumlösung, 3) Benzol, 4) Methylalkohol, 5) Amylalkohol, 6) Mischung aus Methylalkohol und Benzol, 7) Mischung aus Methyl- und Amylalkohol. Für jede Substanz wird bestimmt:

1) Der Brechungsindex für die D-Linie nach S. 244.

2) Die Dichte mit dem Pyknometer nach S. 62.

Daraus berechnet man die specifischen Brechungsvermögen der einzelnen Flüssigkeiten; ferner berechnet man für die Mischungen 6) und 7) nach der oben gegebenen Formel das specifische Brechungsvermögen und vergleicht den berechneten Werth mit dem beobachteten.

Beispiel: Mischungen von Aethyl- und Amylalkohol. $p = 92$ gr C_2H_6O; $p_2 = 88$ gr $C_5H_{12}O$. $n_1 = 1{,}3615$; $d_1 = 0{,}7875$; $n_2 = 1{,}4071$; $d_2 = 0{,}8089$ (bei 20° C.). $N = 1{,}3843$, $D = 0{,}7997$ ϱ_N berechnet $= 0{,}4807$, beobachtet $= 0{,}4805$, ϱ_{N^2} berechnet $= 0{,}2926$, beobachtet $= 0{,}2926$.

Uebung. Brechungsindex und chemische Constitution. Untersucht werden: 1) Wasser, 2) Benzol, 3) Methylalkohol, 4) Aethylalkohol, 5) Amylalkohol, 6) Acetaldehyd, 7) Essigsäure. Für diese Körper werden die Brechungsindices und die Dichten bestimmt; daraus die molecularen Brechungsvermögen R nach beiden Formeln berechnet und mit ihrer Hülfe die Atomrefractionen der einzelnen in ihnen enthaltenen Elemente, wie es im Beispiel angegeben ist.

---

[1]) Wenn man für verschiedene Theile des Spectrums die Brechungsindices bestimmen will, muss man für jede Linie von Neuem auf das Minimum der Ablenkung einstellen, sonst muss man nach den S. 240 mitgetheilten Formeln rechnen; bei nicht sehr genauen Messungen genügt es, diese Lage für einen Strahl im mittleren Theile des Spectrums aufzusuchen, dann ist sie nahezu auch für die anderen Strahlen vorhanden.

Beispiel:

	CH_4O	C_2H_6O	$C_5H_{12}O$	C_2H_4O	$C_2H_4O_2$	H_2O
d (20° C.) =	0,8029	0,7875	0,8089	0,7799	1,0485	0,9984
^nD =	1,3371	1,3615	1,4071	1,3316	1,3737	1,3330
M =	32	46	88	44	60	18
$R = M\varrho^n$ =	13,44	21,12	44,29	18,71	21,39	6,00
$R = M\varrho^{n2}$ =	8,29	12,94	26,79	11,53	13,06	3,71

Daraus folgt für die Gruppe CH_2 die nach beiden Formeln constante Differenz von 7,70 bezw. 4,63. Für die Atomrefraction des mit zwei Valenzen an C gebundenen Sauerstoffs O″ folgt aus R für C_2H_4O'' (= $[(CH_2)_2O'']$) r = 3,31 bezw. 2,27. Für den in $C_2H_4O'O''$ = $([(CH_2)_2 + O''] + O')$ mit einer Valenz gebundenen Sauerstoff O′ ist r = 2,68 bezw. 1,53. Hiernach erhält man unter Benutzung der Werthe für H_2O für die Atomrefraction des Wasserstoffs 1,66 bezw. 1,09, und für die Atomrefraction der mit einer Valenz gebundenen Kohlenstoffatome 4,38 bezw. 2,45.

Allgemeines. Innerhalb weiter Grenzen gilt angenähert der Satz: die Atome der einzelnen Elemente treten mit nahezu derselben Atomrefraction in die Verbindungen ein, falls sie nicht in verschiedener Weise gebunden sind, wie ihre Constitutionsformel andeutet. Ermittelt man durch Addition der Atomrefractionen der Elemente, wie sie sich aus Beobachtungen an Verbindungen ohne Doppelbindung ergeben, die Molecularrefraction einer Verbindung, und weicht diese von der beobachteten ab, so bezeichnet man den Ueberschuss, denn einen solchen findet man, als Refractionsincrement. Solche Incremente treten z. B. auf, wenn an Stelle der einfachen Bindungen doppelte oder mehrfache treten.

Nach Conrady ergeben sich folgende Werthe für die Atomrefraction bei der D-Linie und nach Landolt für die C-Linie unter Zugrundelegung der Formel von Lorenz. In der folgenden Tabelle be-

	Genaues Atomgew.	Atomrefr. für D	Genähertes Atomgew.	Atomrefr. für D	Nach Landolt für C
H	1	1,051	1	1,051	1,04
C'	11,97	2,494	12	2,501	2,48
C^0	11,97	2,586	12	2,592	2,48
O'	15,96	1,517	16	1,521	1,58
O^2	15,96	1,679	16	1,683	1,58
O''	15,96	2,281	16	2,287	2,34
$/=$	. . .	1,707	. . .	1,707	1,78 1,85 (Brühl)
Cl	35,37	5,976	35,5	5,998	6,02
Br	79,76	8,900	80	8,927	8,95
J	126,54	14,12	126,5	14,12	13,99

zieht sich C' auf Kohlenstoff, der in einer Kette steht, während C^0 sich auf einzeln stehenden bezieht, O' ist Hydroxylsauerstoff, O^2 Aethersauerstoff, der also an zwei Kohlenstoffatome gekettet ist, O'' ist Aldehyd-

sauerstoff, /= bezieht sich auf das Refractionsincrement bei einer Doppelbindung.

Der Unterschied in den Werthen für den alleinstehenden C^0- und den in fortlaufenden Ketten stehenden C'-Kohlenstoff ist sehr klein, so dass man damit nichts über die Constitution entscheiden kann; der Unterschied zwischen dem Aether- und Hydroxylsauerstoff ist sehr deutlich, derjenige zwischen dem Hydroxyl- und Aldehydsauerstoff sehr gross.

Auch die Atomrefractionen der einwerthigen Elemente Cl, Br, J etc. haben je nach deren Stellung verschiedene Werthe, die Molecularrefraction ist also eine constitutive Eigenschaft (vgl. S. 77).

Der obige Satz ergiebt sich aus den allgemeinen Lichttheorien, falls wir annehmen, dass ein Atom in seinem optischen Verhalten beim Eintritt in die Verbindung keine oder doch stets eine gleiche Veränderung erfährt. Vorausgesetzt ist aber nicht nothwendig, dass die Atome mit der ihnen im unverbundenen Zustande zukommenden Atomrefraction eintreten. — Der Satz muss seine Gültigkeit verlieren, wenn die obigen Annahmen nicht erfüllt sind. Hierin ist wohl auch der Grund zu suchen, dass für dasselbe Element die Werthe der Atomrefraction r andere werden, wenn es Doppelbindungen etc. eingeht (s. w. o.), dass also die Atomrefraction je nach der Art der Bindung eine verschiedene ist.

IV. Totale Reflexion.

Gebraucht wird: Totalreflectometer von F. Kohlrausch; Schwefelkohlenstoff; Brenner mit Platinlöffel und Chlornatrium; Glasplatte; Glasplatte mit eingeschliffener Höhlung und Deckgläschen; Topaskrystall.
Abbe's Refractometer mit Tabelle; Cassiaöl; Flussspathkrystall.
Totalreflectometer nach Pulfrich mit Zubehör.

Einleitung. Ist n der Brechungsindex aus Luft in Glas, i' der Einfallswinkel in der Luft, r' der Brechungswinkel im Glas, so ist:

$$\frac{\sin i'}{\sin r'} = n,$$

wo $n > 1$ ist. Geht der Strahl aus Glas in Luft, ist i der Einfallswinkel im Glase, r der Brechungswinkel in der Luft, so ist (vgl. S. 234):

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n} = \nu \quad \text{und} \quad \sin r = n \sin i,$$

wo $\nu < 1$ ist. $\sin r$ kann nie grösser als 1, r nie grösser als 90^0 werden, also kann der Lichtstrahl nur so lange aus dem Glase in die Luft austreten, als $n \sin i < 1$ ist; dann tritt ein Theil des Lichtes in die Luft aus, ein Theil wird „partiell" reflectirt. Sobald $n \sin i > 1$ ist, wird alles Licht reflectirt: wir haben „totale" Reflexion. Eine totale Reflexion findet nur statt, wenn das Licht aus einem optisch dichteren auf ein optisch dünneres Medium fällt. Der Winkel J, bei dem die totale Reflexion beginnt, heisst Grenzwinkel der totalen Reflexion, für ihn ist:

$$\sin J = 1/n = \nu.$$

Fallen Strahlen bei wachsenden Einfallswinkeln auf die Grenze von Glas und Luft, so erkennt man den Eintritt der totalen Reflexion an der plötzlichen Zunahme der Helligkeit des reflectirten Lichtes.

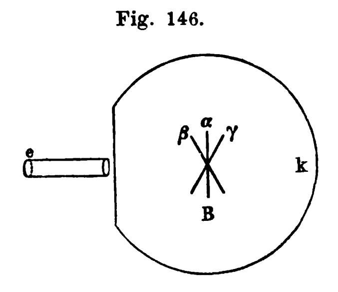
Fallen Strahlen im dichteren Medium gerade unter dem Grenzwinkel der totalen Reflexion auf die Grenze, so treten sie streifend aus, es ist $\sin r = 1$, $r = 90^0$; fallen umgekehrt Strahlen streifend im dünneren Medium auf die Grenze, so treten sie unter dem Grenzwinkel der totalen Reflexion aus.

1. Totalreflectometer von F. Kohlrausch.

Princip. In dem mit stark brechender Flüssigkeit (CS_2) gefüllten cylindrischen Gefässe *k*, Fig. 146, das vorn durch eine ebene Platte verschlossen ist, ist die Platte *B* um eine verticale Axe drehbar. Das Gefäss ist mit durchscheinendem Papier umgeben, das, von rückwärts beleuchtet, gleichsam zum Selbstleuchter wird. Vor der Platte ist ein Fernrohr *e* mit Fadenkreuz aufgestellt. Dreht man die Platte aus der Lage α in die Lage β, so werden auf dem Fadenkreuz des auf Unendlich eingestellten Fernrohres *e* Strahlen vereint, die unter immer grösseren Einfallswinkeln auf die Platte *B* fallen. Ist der Brechungsindex der Platte kleiner als der der Flüssigkeit, so ist bei einem bestimmten Winkel für die auf der linken Seite des Fadenkreuzes vereinten Strahlen totale Reflexion eingetreten, während dies für die auf der rechten Seite noch nicht der Fall ist. Eine Grenze zwischen helleren und dunkleren Theilen, die durch den Schnittpunkt des Fadenkreuzes geht, durchzieht das Gesichtsfeld von oben nach unten.

Diejenigen von der beleuchteten Papierwand kommenden Strahlen, die gerade auf dem Fadenkreuz nach der Reflexion vereint werden, haben eine totale Reflexion erfahren. Ihr Einfallswinkel ist nach dem Satz von Gleichheit des Reflexions- und Einfallswinkels gleich dem Winkel, den die Normale auf der reflectirenden Fläche mit der Fernrohraxe bildet. Dreht man nun die Platte aus der Lage β durch α nach γ, bis wieder dieselbe Erscheinung eintritt, so entspricht diese Drehung dem doppelten Grenzwinkel der totalen Reflexion *J* zwischen Flüssigkeit und festem Körper.

Fig. 146.



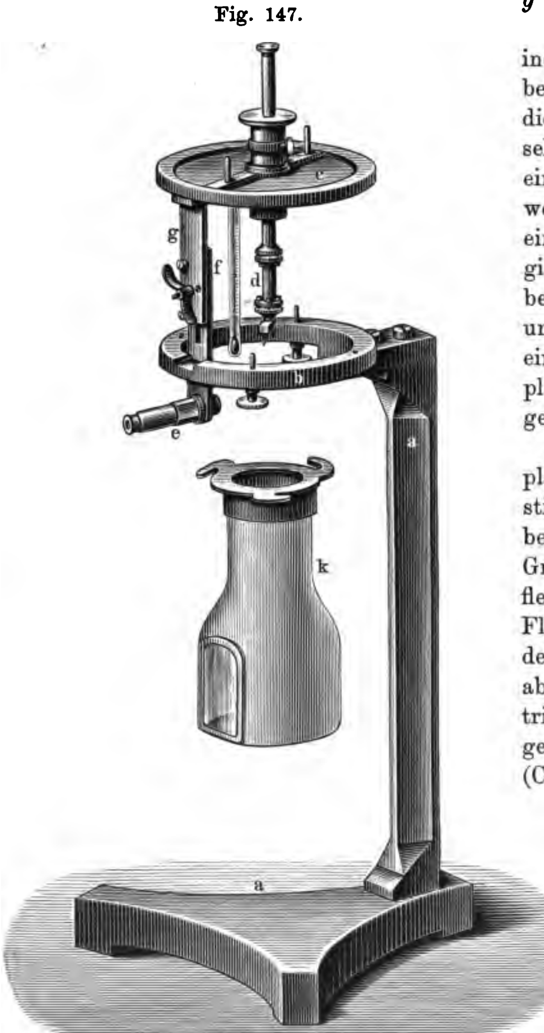
Wir erhalten aus *J* zunächst den Brechungsindex ν für den Uebergang aus Schwefelkohlenstoff in Glas. Um den Brechungsindex *n* aus Luft in Glas zu erhalten, muss ν mit dem Brechungsindex aus Luft in Schwefelkohlenstoff *N* (s. S. 235) multiplicirt werden, es ist also:

$$n = N\nu = N \sin J.$$

Apparat: Das bis auf die mit einer Spiegelglasplatte verschlossene Vorderfläche mit geöltem Papier umkleidete Gefäss *k* (Fig. 147, a. f. S.) wird mittelst Bajonettverschluss in dem Ringe *b* befestigt. Auf diesem ruht die Platte *c*, welche an ihrem Rande eine (in der Figur fortgelassene) Theilung trägt. Durch ihre Mitte geht die Stange *d*, welche durch eine Druckschraube gehalten wird. Am Ende von *d*, welches gewöhnlich eine in zwei Kugelgelenken bewegliche Klemme zum Festhalten der zu messenden Substanzen trägt, kann auch eine Platte *h* befestigt werden, an der hinter einem kleinen Fenster plattenförmige

Körper durch eine Feder *i* festgehalten werden. Die Platte *c* trägt ausserdem ein kleines Thermometer und das an der Stange *f* und *g* befestigte Fernrohr *e*.

Fig. 147.



Soll der Brechungsindex einer Flüssigkeit bestimmt werden, so dient zur Aufnahme derselben eine Höhlung in einer ebenen Glasplatte, welche zwischen *i* und *h* eingeklemmt wird; man giesst in dieselbe die betreffende Flüssigkeit und schliesst sie durch eine aufgelegte dünne, planparallele Glasplatte gegen die Umgebung ab. Der Einfluss der Glasplatte fällt aus der Bestimmung heraus; man bestimmt zwar die Grenze der totalen Reflexion an Glas und Flüssigkeit, die Richtung der reflectirten Strahlen aber wird bei dem Austritt aus Glas in die umgebende Flüssigkeit (CS_2) so geändert, dass der Winkel, den man beobachtet, der gleiche ist, wie der Grenzwinkel bei totaler Reflexion an der Grenze von Schwefelkohlenstoff und der zu untersuchenden Substanz.

I. Einfach brechende Körper.

A. Brechungsindex einer Glasplatte.

Uebung. 1) Man befestigt an dem Träger *d* die Platte möglichst parallel zu der Axe und hängt das Gefäss mit Schwefelkohlenstoff *k* an *b*.

2) Man stellt eine Natriumflamme auf die rechte Seite (Vorsicht

wegen Feuersgefahr), und dreht die Platte so lange, bis die Grenze der totalen Reflexion das Fadenkreuz schneidet; die Lage der Platte wird an der einen Alhidade abgelesen: α [1]).

3) Dasselbe wird auf der linken Seite wiederholt und an derselben Alhidade abgelesen: β. Dann ist:

$$J = {}^1/_2\,(\alpha - \beta).$$

Der Brechungsindex ist:

$$n = N \sin {}^1/_2\,(\alpha - \beta).$$

Bei Schwefelkohlenstoff ist der Brechungsindex N für Natriumlicht bei 20° 1,6274 und nimmt für 1° Temperaturerhöhung um 0,0008 ab.

Beispiel: Glasplatte: $\alpha = 155^0\,51'$, $\beta = 18^0\,45'$; ${}^1/_2\,(\alpha - \beta) = 68^0\,33'$ Temperatur 16°, also $N = 1{,}6274 + 0{,}0008 . 4 = 1{,}6306$. $n = 1{,}5176$.

B. Brechungsindex einer Flüssigkeit.

Uebung. 1) Man füllt die Höhlung der oben erwähnten Glasplatte mit Wasser, setzt das Deckgläschen auf, ohne eine Luftblase einzuschliessen, und klemmt beide fest.

2) Die Bestimmung des Brechungsindex ist dem Obigen zufolge ganz ebenso wie bei *A*. (Die der Totalreflexion an der Grenzfläche von Wasser und Glas entsprechende Grenze zwischen Hell und Dunkel, die man hier zu benutzen hat, ist diejenige, welche die Theile grösster von denen mittlerer Dunkelheit trennt; die andere rührt von der Reflexion zwischen Schwefelkohlenstoff und Glas her.)

Beispiel: $\alpha = 143^0\,24'$, $\beta = 34^0\,0'$, ${}^1/_2\,(\alpha - \beta) = 54^0\,42'$. Temperatur 16°, $N = 1{,}6306$, $n = 1{,}3308$.

II. Brechungsindex eines Krystalles.

Princip. Bei einem doppeltbrechenden Krystall entstehen aus einem einfallenden Strahl zwei gebrochene, die verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeiten, also auch verschiedene Brechungsindices haben, für die also bei verschiedenen Einfallswinkeln totale Reflexion eintritt. Dreht man eine Platte eines doppeltbrechenden Krystalles in einem stark brechenden Medium von kleinen Einfallswinkeln zu immer grösseren, so ist, ehe überhaupt für einen Strahl totale Reflexion eintritt, das Gesichtsfeld von dem partiell reflectirten Licht beider Strahlen erleuchtet; bei einem bestimmten Einfallswinkel wird der Strahl (*a*) mit dem kleineren Brechungsindex total reflectirt, man sieht eine Grenze zwischen weniger hell und heller; bei weiterem Drehen wird auch der zweite Strahl total reflectirt, man erhält eine zweite Grenze (*b*) zwischen zwei verschieden hellen Theilen. Man sieht meist beide Grenzen gleichzeitig im Gesichtsfelde, der Raum zwischen beiden erscheint, obgleich

[1]) Bei genauen Bestimmungen liest man beide Alhidaden ab und bildet das Mittel, wobei darauf zu achten ist, ob man durch die Nulllage hindurchgegangen ist.

er überall gleich hell ist, durch Contrast an den der totalen Reflexion anliegenden Stellen heller [1]).

Uebung. Brechungsindex eines Topaskrystalles. Es wird in derselben Weise wie oben auf beide Grenzen eingestellt.

Beispiel: Strahl $a : \alpha = 174^0 24'$, $\beta = 7^0 09'$, $\frac{1}{2}(\alpha - \beta) = 83^0 42'$; Strahl $b : \alpha = 172^0 3'$; $\beta = 9^0 18'$, $\frac{1}{2}(\alpha - \beta) = 81^0 18'$, $T = 16^0$, $N = 1{,}6306$, $n_a = 1{,}6208$, $n_b = 1{,}6120$.

2. Totalreflectometer von Abbe.

Princip. Zwei rechtwinkelige Prismen ABC und DEF mit ungleich langen Katheten werden mit ihren Hypotenusenflächen AC und ED an einander gelegt, vor die Fläche BC ist noch ein rechtwinkeliges Prisma gekittet (CHG). Befindet sich zwischen AC und ED Luft oder eine Substanz von kleinerem Brechungsindex als das Glas, so wird beim Drehen der Prismen um eine durch O gehende, zur Ebene der Zeichnung senkrechte Axe ein in der Richtung WV das System durchsetzender Lichtstrahl bei einer gewissen Stellung der Prismen an der Fläche ED total reflectirt. Ein in der Richtung V gelegenes Auge sieht dann eine in W gelegene homogene Lichtquelle sogleich, eine weisse, nachdem sie eine Reihe von Farben durchlaufen hat, verschwinden: die verschiedenen Farben erfahren successive eine totale Reflexion und die übrigbleibenden geben eine Mischfarbe. Flüssigkeiten bringt man direct zwischen die Prismen. Feste Körper schleift man zu dünnen Platten, legt sie gleichzeitig mit einem Tropfen einer Flüssigkeit, die stärker bricht als sie selbst und sie nicht angreift, zwischen die Prismen. Solche Flüssigkeiten mit hohem Brechungsindex sind Cassiaöl ($n = 1{,}60$), Zimmetaldehyd ($n = 1{,}62$), Monobromnaphtalin ($n = 1{,}66$), Arsenbromür ($n = 1{,}781$), Naphtylphenylketon ($n_B = 1{,}654$, $n_E = 1{,}678$), Metacinnamen ($n_D = 1{,}593$).

Die dünne Flüssigkeitsschicht zwischen dem Prisma und dem zu untersuchenden Körper ist ohne Einfluss auf die Resultate.

Apparat (Fig. 149).

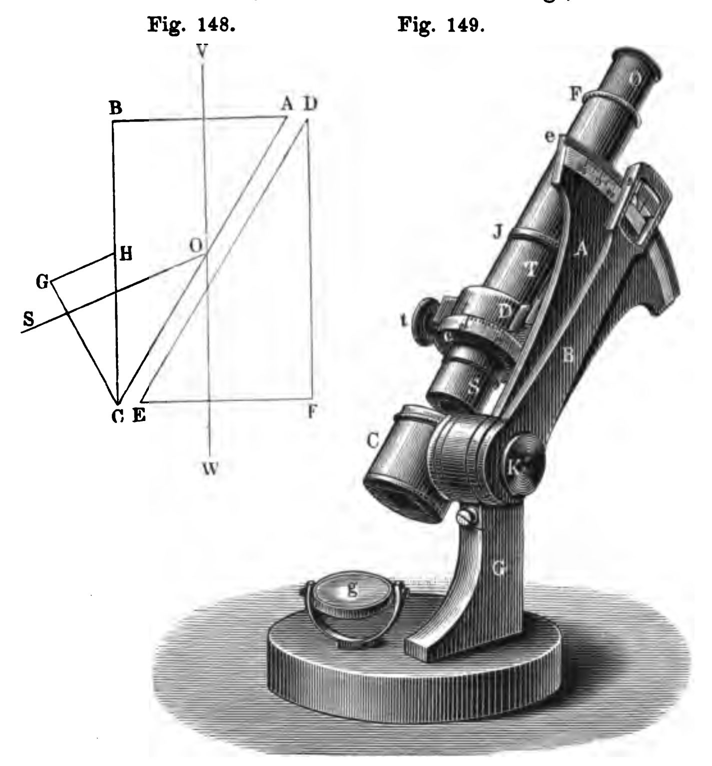
An dem Fernrohr OJ, in welchem bei F zwei Fadenkreuze ausgespannt sind, ist durch die Hülse T der Compensator D befestigt, der dazu dient, die bei der Totalreflexion auftretende Farbenzerstreuung aufzuheben und zu messen. Derselbe besteht aus zwei gleichen Prismensätzen mit gerader Durchsicht (vgl. bei Spectralanalyse), die durch die Schraube t in entgegengesetzter Richtung gedreht werden können; für die an der auf D angebrachten Scala c abgelesene Stellung T giebt eine dem Instrumente beigegebene Tafel die Dispersion Δ, d. h. die Differenz der Brechungsindices zwischen zwei Linien des Sonnenspectrums. Das Fernrohr ist an dem Sector A befestigt, der durch die Schraube K in

[1]) Ueber Messung mit einem Ocularmikrometer ist die Arbeit von F. Kohlrausch selbst zu vergleichen (Wiedemann's Annalen 4, 1, 1878).

einer solchen Stellung zu dem dem Fenster zugekehrten Spiegel *g* festgestellt wird, dass das Gesichtsfeld gleichmässig hell erscheint.

Vor dem Fernrohr wird das Glasparallelepiped *C* (Fig. 149), vgl. auch Fig. 148, mittelst eines Bajonettverschlusses befestigt und dadurch mit der Alhidade *B*, die oben einen Index trägt, fest verbunden.

Fig. 148. Fig. 149.



An der auf *A* angebrachten Theilung werden die Brechungsindices für das mittlere Gelb unmittelbar abgelesen.

I. Flüssigkeiten.

Uebung. 1) Das Instrument wird nach vorn gedreht, bis es fast horizontal liegt und das bewegliche Stück des Doppelprismas durch Niederdrücken einer Feder entfernt.

2) Die Prismenflächen werden gereinigt, zwischen dieselben an den senkrecht zur Ebene der Zeichnung stehenden Kanten kurze Streifen von dünnem Papier gelegt und auf die Fläche des festen Prismas wird ein Tropfen der zu untersuchenden Flüssigkeit gebracht.

3) Das bewegliche Prisma wird eingesetzt, das Fernrohr herumgedreht und die Alhidade an den Anfang der Theilung gebracht; das Instrument und der Spiegel *g* werden so gestellt, dass das Gesichtsfeld gleichmässig erleuchtet ist.

4) Man bewegt die Alhidade aufwärts, bis die untere Hälfte des Gesichtsfeldes dunkel erscheint; dieselbe ist von dem oberen hellen Theile des Gesichtsfeldes durch einen farbigen Saum getrennt.

5) Durch Drehen an der Schraube t verwandelt man die Grenze zwischen Hell und Dunkel in eine möglichst farblose Linie.

6) Man stellt durch Drehen an der Alhidade die Grenzlinie auf die Durchschnittspunkte der Fäden und liest die Stellung der Alhidade (A_1) und der Trommel D (T_1) ab.

7) Man dreht an dem Triebkopf t so lange, bis die Grenzlinie zum zweiten Male farbenrein erscheint, stellt mit der Alhidade abermals ein und liest zum zweiten Male ab: A_2 und T_2.

Zur Berechnung dient eine dem Instrument beigegebene Tafel.

Beispiel: Destillirtes Wasser: $A_1 = 1,3268$, $T_1 = 36,5$. $A_2 = 1,3274$, $T_2 = 36,7$. $A = 1,3271$, $T = 36,6$. Aus der dem Instrument beigegebenen Tafel findet man: $\Delta = 0,04299$.

II. Brechungsindex von festen Körpern.

Uebung. 1) Das Fernrohr wird umgelegt, das bewegliche Prisma abgenommen und ein Tropfen einer stärker als der zu untersuchende Körper brechenden Flüssigkeit, z. B. Cassiaöl, auf das feste Prisma gebracht.

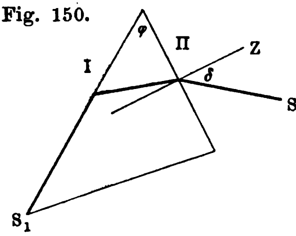
2) Der Körper wird mit einer ebenen, polirten Fläche auf das Prisma gelegt, das bewegliche Prisma wieder aufgesetzt und durch einen Drahtbügel auf demselben festgehalten. Das Fernrohr wird wieder herumgedreht und weiter wie unter 1) verfahren.

Beispiel: Flussspath: Brechungsindex gegen Luft $n_{12} = 1,4331$, der Brechungsindex der dazwischen geschalteten Flüssigkeitsschicht fällt heraus.

3. Totalreflectometer nach Pulfrich.

Einleitung. Lässt man (Fig. 150) auf die eine Fläche I eines Prismas ein breites Strahlenbündel S_1 homogenen Lichtes streifend auffallen, so sieht man in einem Fernrohre in der Richtung S das an der Fläche II austretende Bündel S auf der einen Seite scharf abgeschnitten (Fig. 152): Die Grenzstrahlen entsprechen den auf I genau streifend auftreffenden Strahlen. Ihr Austrittswinkel an der Fläche I ist gleich dem Grenzwinkel der totalen Reflexion.

Fig. 150.



Ist δ der Austrittswinkel für die Grenzstrahlen an der Fläche II, φ der brechende Winkel, so ist:

$$\sqrt{N^2 - 1} = \frac{\cos\varphi + \sin\delta}{\sin\varphi}.$$

Grenzt die Fläche I nicht an Luft, sondern an eine beliebige Substanz vom Brechungsindex n, so ist

$$n = \sin\varphi \sqrt{N^2 - \sin^2\delta} - \cos\varphi \sin\delta.$$

Ist $\varphi = 90^0$, so wird

$$n = \sqrt{N^2 - \sin^2\delta}.$$

Statt eines dreiseitigen Prismas verwendet man zweckmässiger einen Würfel, auf dessen Oberfläche man die zu untersuchende Substanz legt. Flüssigkeiten bringt man in einen auf die horizontale Fläche aufgekitteten Trog. Den Gang der von links kommenden Strahlen und das Bild, welches das Auge direct resp. im Fernrohre sieht, geben die Fig. 151 und 152.

Apparat. Er ist im Wesentlichen ein kleines Spectrometer ohne Collimatorrohr, dessen Drehungsaxe horizontal gestellt ist (Fig. 153, a f. S.).

Auf den rechtwinkeligen Würfel P ist ein Glasrohr G gekittet, das zur Aufnahme der zu untersuchenden Körper dient. In Flüssigkeiten wird ein Thermometer t eingesetzt. P wird von einem besonders construirten, auf der Fussplatte des Instrumentes befestigten Träger in seiner Stellung ein- für allemal festgehalten. Die Justirung wird durch eine Art von Kugelgelenk und drei Stellschrauben unter dem Halter des Würfels ermöglicht. Der Theilkreis T mit dem auf Unendlich eingestellten Fernrohre F dreht sich um eine horizontale Axe A. Das Fernrohr ist gebrochen, so dass die Ocularaxe O stets horizontal bleibt und jede gezwungene Stellung des Beobachters vermieden ist.

Fig. 151.

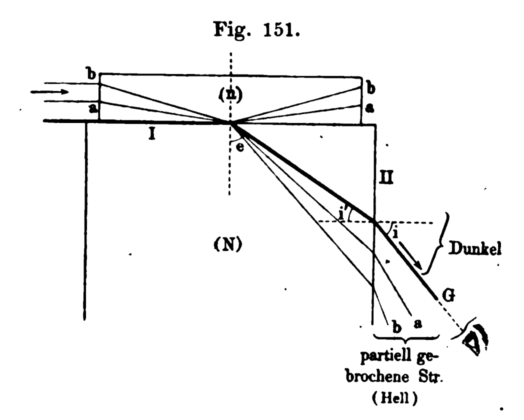


Fig. 152.

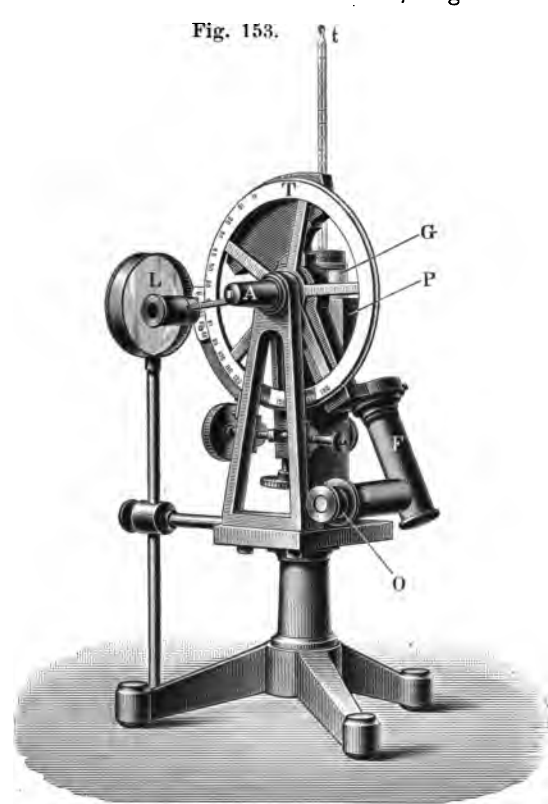


Die Linse L dient dazu, das von der Lichtquelle kommende Strahlenbündel schwach convergent zu machen. Der Würfel wird so justirt, dass die Axe des Fernrohres bei der Nullstellung desselben der Normalen auf der Würfelfläche II parallel ist. Man stellt mittelst Stell- und Mikrometerschraube das Fadenkreuz genau auf die Trennungslinie des Gesichtsfeldes ein und liest den Winkel δ direct ab.

Uebung 1. Justirung des Würfels. 1) Man stellt das Fernrohr auf den Theilstrich 0 des Theilkreises fest ein, setzt vor das Ocular des Fernrohres 45^0 gegen die Axe geneigt ein Glasplättchen (Gauss'sches Ocular) und verstellt den Würfel P so lange, bis der Horizontalfaden mit seinem Spiegelbilde in der verticalen Fläche sich deckt.

2) Man dreht das Fernrohr um 90° und verfährt mit der horizontalen Fläche des Würfels ebenso, möglichst ohne an der Einstellung der verticalen Fläche etwas zu ändern. Man wiederholt das Verfahren, bis bei beiden Lagen eine Deckung des Fadens mit seinem Spiegelbilde stattfindet.

Fig. 153.



Stellt man dann das Fernrohr auf irgend einen Strahl nach seinem Austritt an der Fläche II ein, so liest man direct die Winkel δ ab.

Uebung 2. **Bestimmung der Constanten N des Würfels.** 1) Man füllt den Glastrog G mit destillirtem Wasser, stellt in dasselbe ein Thermometer und beleuchtet mit Na-Licht.

2) Man stellt das Fadenkreuz des Fernrohres auf die Grenze zwischen Hell und Dunkel und liest den Winkel δ ab.

3) Man berechnet die Grösse N nach der Formel $N = \sqrt{n^2 + \sin^2\delta}$, indem man dem Brechungsindex des Wassers die Werthe aus Tabelle 18 giebt.

Uebung 3. **Bestimmung des Brechungsindex von Flüssigkeiten.** Man verfährt wie bei Uebung 2 und berechnet mit dem dort gefundenen N die Werthe von n.

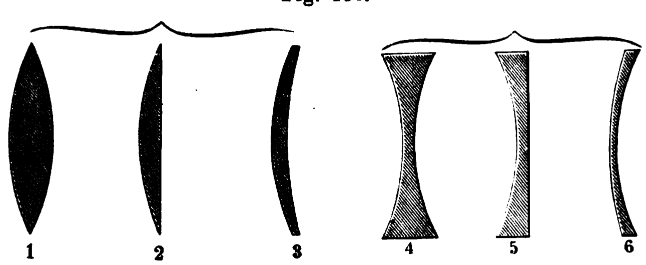
Uebung 4. **Bestimmung des Brechungsindex von festen Körpern, etwa Quarz.** Man giesst in den Trog G Wasser und legt in dieses ein auf der unteren Seite eben geschliffenes Stück des zu untersuchenden Körpers und bestimmt für denselben den Winkel δ, daraus erhält man dann n. [Der Einfluss der dünnen planparallelen Schicht der Flüssigkeit zwischen dem Prisma und dem festen Körper fällt bei der Berechnung heraus (S. 254).]

V. Linsen.

Gebraucht wird: Optische Bank mit Trägern und Papierschirm; Lampe mit zwei Cylindern, vergl. S. 230; Convex- und Concavlinsen mit Kappen, vergl. S. 266; Maassstab.

Einleitung: Linsen sind durchsichtige Körper, welche durch bestimmte Flächen, gewöhnlich durch zwei Kugelflächen oder eine Kugelfläche und eine Ebene begrenzt sind. Sie heissen dann sphärische Linsen. Andere Linsen sind durch Cylinderflächen begrenzt, sie heissen Cylinderlinsen. Die durch die Mittelpunkte der Kugeln einer sphärischen Linse gelegte Gerade oder die durch den Mittelpunkt der einen Kugel

Fig. 154.



gehende und auf der ebenen Fläche senkrecht stehende Gerade heisst die Axe der Linse.

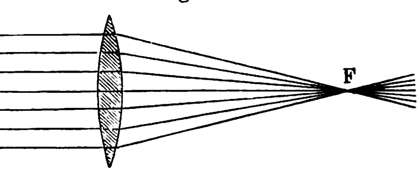
Man unterscheidet (Fig. 154) Sammellinsen 1 bis 3 und Zerstreuungslinsen 4 bis 6. Bei ersteren wächst die Dicke nach der Mitte zu, bei letzteren nimmt sie nach der Mitte hin ab. Je nach der Gestalt der Begrenzungsflächen unterscheidet man bei den Sammellinsen: biconvexe Nr. 1, planconvexe Nr. 2, concavconvexe Nr. 3; bei den Zerstreuungslinsen: biconcave Nr. 4, planconcave Nr. 5, convexconcave Nr. 6.

Die Sammellinsen vereinigen parallel auffallende, etwa von der Sonne kommende Strahlen in einem Punkte F (Fig. 155), in dem sogenannten Brennpunkte. Hält man in ihn ein Blatt Papier, so erhält man ein reelles Bild der Sonne.

Die Zerstreuungslinsen werfen parallel auffallende Strahlen aus einander, und zwar so, als ob sie aus einem Punkte F (Fig. 156) vor der Linse kämen. In diesem Punkte F schneiden sich die Strahlen

nicht wirklich, sondern nur ihre Verlängerungen nach rückwärts, man kann sie hier nicht auffangen. Man bezeichnet auch hier den Punkt F als den Brennpunkt, doch ist er hier ein virtueller Zerstreuungspunkt (vergl. S. 232).

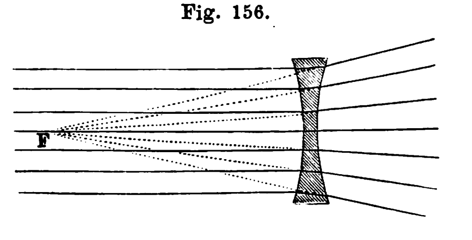
Fig. 155.



Sammellinsen haben reelle Brennpunkte, Zerstreuungslinsen virtuelle.

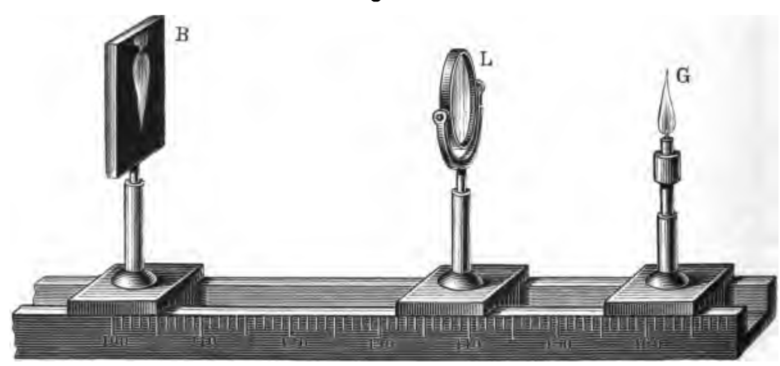
Die Entfernung φ des Punktes F von der Linse nennt man bei den Sammellinsen die Brennweite, bei den Zerstreuungslinsen die Zerstreungsweite oder die negative Brennweite.

Fig. 156.



Stellt man vor eine Sammellinse L (Fig. 157) einen Gegenstand G in der Entfernung a von der Linse, „der Gegenstandsweite", welche grösser als die Brennweite φ ist, auf, so werden die von einem jeden Punkte des Gegenstandes ausgehenden Strahlen wieder in einem Punkte vereinigt; man erhält ein Bild B des Gegenstandes in

Fig. 157.



der Entfernung b „der Bildweite" von der Linse. Für Sammellinsen wie für Zerstreuungslinsen gilt die Formel:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{\varphi}.$$

Bei Sammellinsen ist φ positiv, bei Zerstreuungslinsen negativ. Ein negatives b bedeutet, dass das Bild auf derselben Seite wie der Gegenstand liegt.

Die Gegenstandsgrösse L verhält sich zur Bildgrösse l wie die Gegenstandsweite zur Bildweite, d. h. es ist

$$L : l = a : b.$$

Das Verhältniss der Flächen des Gegenstandes G und des Bildes g ist:

$$G : g = L^2 : l^2 = a^2 : b^2.$$

Wie bei den gekrümmten Spiegeln erhält man auch bei den Linsen reelle und virtuelle Bilder. Reelle Bilder sind verkehrt, virtuelle dagegen aufrecht stehend.

Wir haben nach der Formel reelle Bilder, wenn bei gegebener Brennweite φ und gegebener Gegenstandsweite a die Bildweite b positiv ist, das Bild also hinter der Linse liegt, virtuelle, wenn b negativ ist.

Die Beziehungen zwischen Lage und Grösse von Bild und Gegenstand sind folgende:

1. Sammellinsen.

Von $a = \infty$ bis $a = 2\,\varphi$, d. h. wenn der Gegenstand aus der Unendlichkeit bis in die doppelte Brennweite heranrückt, hat man reelle, verkehrte, kleinere Bilder zwischen der Brennweite und der doppelten Brennweite. — Von $a = 2\,\varphi$ bis $a = \varphi$, d. h. wenn der Gegenstand von der doppelten Brennweite bis zur Brennweite rückt, reelle, verkehrte, grössere Bilder zwischen der doppelten Brennweite und der Unendlichkeit. — Von $a = \varphi$ bis $a = 0$, d. h. wenn der Gegenstand von der Brennweite bis an die Linse heranrückt, hat man virtuelle, aufrechte, grössere Bilder, die aus der Unendlichkeit bis an die Linse heranrücken.

2. Zerstreuungslinsen.

Von $a = \infty$ bis $a = 0$, d. h. wenn der Gegenstand von der Unendlichkeit bis an die Linse heranrückt, hat man virtuelle, aufrechte, kleinere Bilder. Ist a negativ, d. h. liegt der Gegenstand hinter der Linse, so wird b positiv und man erhält reelle Bilder. Dieser Fall tritt ein, wenn auf eine Zerstreuungslinse ein convergentes Strahlenbündel fällt, das ohne dieselbe ein Bild hinter der Linse entwerfen würde (s. S. 271 und das holländische Fernrohr).

I. Vorübung.

Auf Schlitten der optischen Bank (vergl. S. 220) werden gesetzt: eine Lampe mit Schwarzblechcylinder, wie auf S. 230, eine Sammel- oder eine Zerstreuungslinse und ein Schirm.

Die Linse wird allmählich aus möglichst grosser Entfernung der Lampe genähert und die Lagen des Schirmes aufgesucht, bei denen die Bilder auf ihm scharf erscheinen; ferner wird die wechselnde Grösse derselben beachtet. Sind keine Bilder mehr zu erhalten, so nimmt man den Schirm fort und beobachtet direct mit dem Auge. Man überzeugt sich zunächst davon, dass bei den Stellungen der Linse, bei denen

dieselbe reelle, verkehrte Bilder auf dem Schirm liefert, man auch verkehrte Bilder sieht, und zwar an den Stellen, wo sie vorher auf dem Schirm entstanden. Für die Stellungen der Linse, bei denen man keine Bilder mehr auf dem Schirm erhält, sieht man aufrechte, virtuelle Bilder.

II. Prüfung der Linsenformel und Methoden zur Bestimmung der Brennweite von Sammellinsen.

A. Directe Methoden zur Bestimmung der Brennweite.

a) Am Ende eines Maassstabes ist senkrecht zu demselben ein weisser Schirm angebracht. Der Maassstab wird so geneigt, dass seine Richtung parallel derjenigen der Sonnenstrahlen ist; längs desselben wird die Linse so lange verschoben, bis ein scharfes Bild der Sonne auf dem Papier entsteht; der Abstand der Linse von dem Papier ist die Brennweite. Statt der Sonne kann man auch das Bild eines fernen irdischen Gegenstandes, eines Hauses, Baumes oder dergl. verwenden.

b) Strahlen, welche von dem Brennpunkte ausgehen und auf eine Linse fallen, werden von dieser parallel gemacht.

Uebung. 1) Ein Fernrohr wird auf einen entfernten Gegenstand scharf eingestellt, so dass das Bild desselben und das Fadenkreuz bei einer Bewegung des Auges sich nicht gegen einander verschieben, dann werden die parallel auf die Objectivlinse des Fernrohres fallenden, von dem Gegenstande kommenden Strahlen auf dem Fadenkreuz vereint, dieses steht im Brennpunkte der Objectivlinse.

2) In einiger Entfernung vom Fernrohre stellt man ein bedrucktes Blatt Papier auf und stellt zwischen dieses und das Fernrohr die zu untersuchende Linse.

3) Man verschiebt die Linse so lange, bis man durch das Fernrohr die Buchstaben möglichst scharf erkennt und sie sich bei einer Verschiebung des Auges nicht gegen das Fadenkreuz verschieben.

4) Man misst mit einem Maassstabe den Abstand zwischen Linse und Papier; er ist die Brennweite φ. Die von jedem Punkte des Papiers kommenden Strahlen fallen parallel auf das Objectiv des Fernrohres; die zu untersuchende Linse hat sie also parallel gemacht, das Papier steht im Brennpunkte derselben.

B. Prüfung der Linsenformel und Benutzung derselben zur Bestimmung der Brennweite.

Auf die optische Bank werden drei Schlitten mit der Lampe mit dem Schwarzblechcylinder mit der grossen Oeffnung, Fig. 127, einer Sammellinie und einem grossen weissen Schirm gesetzt. Auf dem Schirme wird das Bild der Oeffnung aufgefangen.

Uebung. 1) Man stellt den Schirm in einer bestimmten Entfernung vom Gegenstande auf und verschiebt die Linse so lange, bis auf dem Schirme ein deutliches Bild der Oeffnung entsteht.

2) Man liest an der Theilung die Stellungen der Indices an dem Schirm, der Oeffnung im Cylinder und der Linse ab; die Lagen der Indices auf der Bank mögen sein für Gegenstand x, Linse y, Schirm z.

3) Man misst bei jeder Stellung den Durchmesser l des Bildes; der Durchmesser des Gegenstandes L ist immer der gleiche.

Berechnung. Es ist die Gegenstandsweite $a = y - x$, die Bildweite $b = z - y$; aus der Formel $1/\varphi = 1/a + 1/b$ ergiebt sich φ.

Beispiel:				
	$a = y - x =$	50	54,5	85
	$b = z - y =$	140	115,5	65
	$\varphi =$	36,8	37,0	36,8
	$l =$	28	21	7,5
	$10\ b/a =$	28	21,2	7,6

also ist immer $l : L = b : a$.

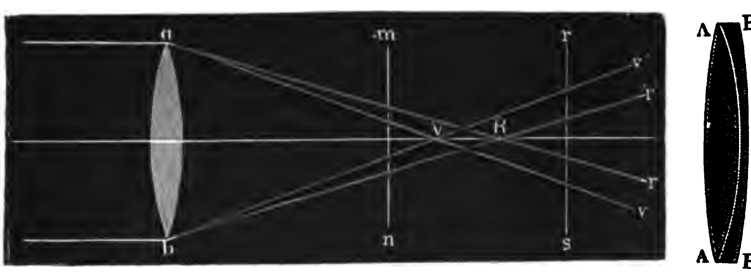
Bei der obigen Linse entstand das Bild einer Kirchthurmspitze im Abstande von 36,8 cm, die Brennweite ist also wie oben $\varphi = 36,8$ cm.

C. Sphärische und chromatische Aberration der Linsen.

Die von den gewöhnlichen Linsen entworfenen Bilder sind nicht ganz weiss, sondern von farbigen Säumen umgeben.

Uebung. 1) Man rückt den Schirm von der Stellung grösster Schärfe des Bildes zwischen V und R an die Linse heran, etwa nach

Fig. 158. Fig. 159.



mn, Fig. 158, das Bild der Oeffnung erscheint von einem gelblich-röthlichen Saume umgeben.

2) Man entfernt den Schirm etwa bis nach rs; der rothe Saum verschwindet und ein blauer tritt am äusseren Rande des Bildes auf.

Erklärung. Die blauen Strahlen av, bv' werden stärker gebrochen und daher näher an der Linse bei V vereinigt, die rothen ar, br' weiter von derselben bei R; die Stellung grösster Schärfe entspricht der Vereinigung der hellsten, d. h. der gelben Strahlen. An der Figur ist der Gang der rothen und blauen Strahlen ersichtlich, auch wie sich die Reihenfolge der Farben von dem mittleren Strahle nach aussen beim Uebergange von mn nach rs umkehrt. Die auf der verschiedenen Brechbarkeit der Farben beruhende Abweichung der Linsenbilder nennt man die „chromatische Abweichung". Man kann sie und damit die farbigen Ränder durch Combination zweier Linsen von verschiedenen

Glassorten, z. B. einer Sammellinse aus Crownglass AA und einer Zerstreuungslinse aus Flintglas BB (Fig. 159) wesentlich vermindern; eine solche Linsenzusammenstellung heisst eine „achromatische Linse“.

3) Man legt ein Lineal an das Bild der Drähte, es ist nicht geradlinig, sondern verzerrt und gebogen (vergl. Fig. 169 bis 171). Diese Verzerrung hat ihren Grund in der sphärischen Gestalt der Linsenfläche und wird daher als „sphärische Aberration“ bezeichnet.

4) Man setzt auf die Linse eine mit schwarzem Papier überzogene Kappe, welche in der Mitte ein circa 2 cm weites Loch hat (ein Diaphragma), durch das man die Randstrahlen abblendet; das Bild wird lichtschwächer, aber sowohl farbenreiner als auch freier von sphärischer Abweichung. Es sind also vornehmlich die Randstrahlen, welche die Störung verursachen. Diese blendet man daher bei allen optischen Instrumenten so weit wie möglich durch Blenden (Diaphragmen) ab.

Die sphärische Abweichung kann man bis zu einem hohen Grade durch Anwendung mehrerer Linsen aus verschiedenem Glase corrigiren; ein solches Linsensystem, welches Bilder ohne merkliche Verzerrungen zeigt, und das namentlich für photographische Zwecke dient, nennt man aplanatische Linsen (Aplanate oder Antiplanate).

D. Methode von Bessel zur Bestimmung der Brennweite.

Stellt man den Schirm in einer nicht zu kleinen Entfernung vom Gegenstande auf, so giebt es zwischen denselben zwei Stellungen der Linse, bei denen auf dem Schirme ein deutliches Bild des Gegenstandes erscheint. Es rührt dies daher, dass in der Formel $1/a + 1/b = 1/\varphi$ bei der zweiten Stellung der Linse das Bild als Gegenstand, der Gegenstand als Bild aufgefasst werden kann. Ist φ die gesuchte Brennweite der Linse, e die Entfernung des Schirmes von dem Gegenstande und v der Abstand der beiden Stellungen der Linse, bei denen ein scharfes Bild entsteht, so ist:

$$\varphi = \frac{1}{4}\left(e - \frac{v^2}{e}\right) = \frac{1}{4e}(e - v)(e + v).$$

Uebung. 1) Man stellt auf der optischen Bank den Schirm in einer gewissen, nicht zu kleinen Entfernung vom Gegenstande auf und stellt die Linse zwischen Gegenstand und Schirm so auf, dass ein scharfes Bild auf dem Schirme entsteht. Stellung des Gegenstandes x, des Schirmes z, der Linse y.

2) Man verschiebt die Linse (aber ohne die Stellung des Schirmes und des Gegenstandes zu verändern), bis wiederum ein deutliches Bild entsteht; Stellung der Linse y_2, dann ist:

$$e = z - x \qquad v = y_2 - y_1.$$

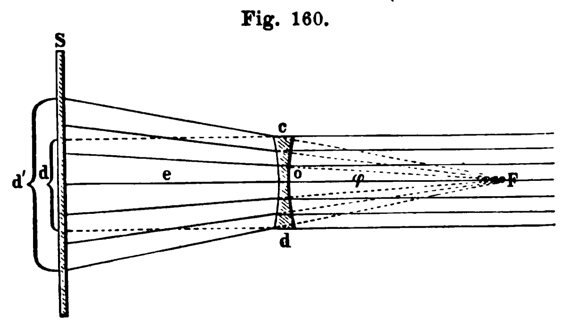
Beispiel: $e = 175$, $v = 69$, $\varphi = 36{,}9$; $e = 150$, $v = 20{,}5$, $\varphi = 36{,}8$.

III. Bestimmung der Brennweite von Zerstreuungslinsen.

A. Directe Methode.

Princip. Ein paralleles Strahlenbündel von kreisförmigem Querschnitt falle auf einen Schirm S (Fig. 160) und beleuchte dort eine Fläche vom Durchmesser d; wir stellen in den Weg der Strahlen eine Zerstreuungslinse in der Entfernung e von dem Schirme auf; durch sie werden die parallelen Strahlen divergent gemacht und erleuchten eine grössere Fläche vom Durchmesser d'; die Strahlen scheinen von

Fig. 160.



einem Punkte F zu kommen, der um die Zerstreuungsweite oder die virtuelle Brennweite φ von der Linse absteht. Aus der Figur folgt:

$$d' : d = (e + \varphi) : \varphi,$$
$$\varphi = e \,.\, d/(d' - d).$$

Stellt man den Schirm so, dass der Durchmesser des Zerstreuungskreises auf ihm doppelt so gross ist als derjenige des ursprünglichen Lichtkreises ohne Linse, so ist:

$$d' = 2\,d, \quad \text{also:} \quad \varphi = e,$$

die Zerstreuungsweite ist gleich dem Abstande von Schirm und Linse.

Uebung 1. Bestimmung der Zerstreuungsweite (Nummer, Dioptrie) eines concaven Brillenglases. 1) Auf einem Stück Cartonpapier bezeichnet man auf zwei senkrecht zu einander gezeichneten geraden Linien vom Schnittpunkte aus auf der einen den grössten, auf der anderen den kleinsten Durchmesser der (meist ovalen) Linsenfassung nach beiden Seiten hin; die beiden zu einander senkrechten Linien sind dann doppelt so lang als die entsprechenden Durchmesser.

2) Man entwirft mit der Linse ein Zerstreuungsoval der Sonnenstrahlen auf dem Blatte, welches man senkrecht zur Richtung der Strahlen stellt.

3) Man nähert die Linse soweit, dass entsprechende Punkte des Randes der Zerstreuungsfigur durch die vier bezeichneten Punkte gehen, dann ist der Durchmesser des Strahlenbündels auf dem Schirme gerade doppelt so gross wie in der Linse.

4) Man misst die Entfernung e der Linse vom Schirme; sie ist gleich der Zerstreuungsweite. Die in rheinischen Zoll (1 Zoll = 2,6 cm)

ausgedrückte Zerstreuungsweite ist die Brillennummer, die in 100 dividirte Centimeterzahl derselben die Dioptrie.

Bemerkung. Die von einem jeden Punkte der Sonne ausgehenden Strahlen sind zwar unter einander vollkommen parallel, aber da die Sonne nicht aus einem einzigen leuchtenden Punkte besteht, gehen die Strahlen doch etwas aus einander; der Durchmesser des Strahlenbündels ist in einigerEntfernung vom Diaphragma grösser als *d*. Indess beträgt die hierdurch hervorgerufene Divergenz nur etwa einen halben Grad.

Uebung 2. 1) Ueber die Lampe auf der optischen Bank wird der Schwarzblechcylinder mit kleiner runder Oeffnung gestellt (vergl. S. 230).

2) Man stellt die Oeffnung in die Brennweite einer mit einer kreisförmigen Blende bedeckten Sammellinse, die auf der optischen Bank steht; dann verlassen die von der Oeffnung ausgehenden Strahlen die Linse als paralleles Strahlenbündel.

3) Man untersucht die Parallelität der Strahlen; dazu stellt man den Schirm in verschiedenen Abständen von der Linse auf und prüft, ob der Durchmesser des hellen Kreises stets gleich gross ist. Man ändert die Stellung der Sammellinse, bis dies der Fall ist.

4) Man misst den Durchmesser der Blende *d*.

5) Man stellt die Zerstreuungslinse zwischen Schirm und Sammellinse, bringt den Schirm in verschiedene Entfernungen *e* von der Zerstreuungslinse und misst die Grösse des Durchmessers *d'* des hellen Kreises.

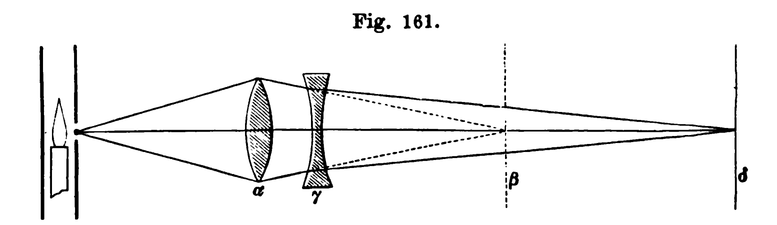
Aus zusammengehörigen Werthen von *e* und *d'* ergiebt sich φ.

Beispiel: $d = 7{,}5$ cm, $d' = 20{,}0$ cm, $e = 30$ cm, $\varphi = 18$ cm.

B. Indirecte Methode mit Hülfe der Linsenformel (S. 262).

Princip. Da parallel oder divergent auffallende Strahlen von einer Zerstreuungslinse nicht zu einem reellen Bilde vereint werden, so

Fig. 161.



muss man, um mit derselben ein reelles Bild zu erhalten, convergente Strahlen auf die Linse fallen lassen, die also einem hinter der Linse gelegenen Gegenstande, d. h. einem negativen a, zukommen. Die Strahlen mögen durch eine Sammellinse α convergent gemacht sein Wenn man dann die Zerstreuungslinse zwischen die Sammellinse und das reelle Bild β, welches sie für sich liefert, einschaltet, so kann das

reelle Bild nicht mehr in β zu Stande kommen. Die Strahlen convergiren weniger und liefern eventuell erst bei δ ein reelles Bild. Hierbei ist also β gewissermaassen ein virtueller Gegenstand für die Linse γ.

Uebung. 1) Man stellt (Fig. 161) die Convexlinse und den Schirm auf der Bank so auf, dass auf letzterem ein scharfes Bild der Oeffnung entsteht. Es sei α die Lage der Linse, β die betreffende Lage des Schirmes (gemessen auf der optischen Bank).

2) Man stellt die Concavlinse zwischen α und β in γ auf und verschiebt den Schirm so lange, bis wieder ein scharfes Bild erzeugt wird. Ist jetzt δ die Lage des Schirmes, so ist $a = -(\beta - \gamma)$, $b = +(\delta - \gamma)$, also:

$$\frac{1}{\varphi} = -\frac{1}{\beta - \gamma} + \frac{1}{\delta - \gamma}.$$

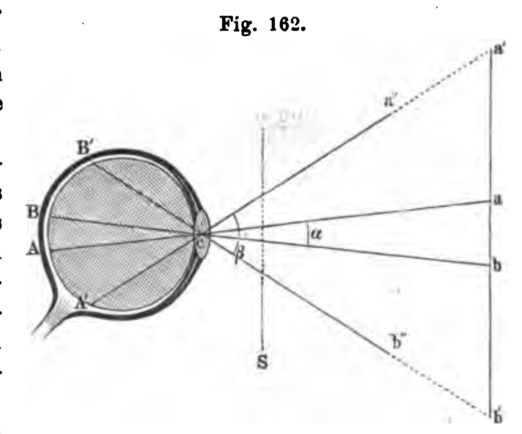
Beispiel: $\beta = 118{,}75$ $\gamma = 105{,}75$ $\delta = 166{,}25$ $\varphi = -16{,}5$
$\beta = 118{,}75$ $\gamma = 104{,}25$ $\delta = 242{,}00$ $\varphi = -16{,}2$
φ ist negativ (vergl. S. 263).

IV. Bestimmung der Vergrösserungszahl von Fernrohren, Mikroskopen und Lupen.

Gebraucht wird: Fernrohre, Mikroskope und Lupen; schwarzes Lineal mit weissen, gleich breiten Querstrichen; Stative; Papierscala; Fassung mit geneigtem Spiegelglas für Mikroskop und Lupe.

Die Vergrösserungszahl eines Mikroskopes ist das Verhältniss des Winkels, unter welchem ein Gegenstand im Mikroskop erscheint, zu demjenigen, unter welchem er gesehen wird, wenn er sich in der deutlichen Sehweite = 25 cm befindet.

Fig. 162.



Die Vergrösserungszahl eines Fernrohres ist das Verhältniss des Winkels, unter welchem ein Gegenstand im Fernrohre erscheint, zu demjenigen, unter welchem er direct gesehen erscheint.

Die Grösse einer Linie ab in der deutlichen Sehweite (Fig. 162) beurtheilen wir nach dem Sehwinkel, dieser ist der Winkel α, unter dem sich die von den Enden von ab ausgehenden Strahlen in dem Mittelpunkte c der Pupille schneiden; denn durch diesen Winkel ist die Strecke bestimmt, um welche

die Bilder A und B der Punkte a und b auf der Netzhaut von einander abstehen. Schalten wir zwischen die an irgend eine Stelle gebrachte Strecke ab und das Auge passende Linsen (in der Figur durch einen Strich S angedeutet) ein, so werden die in der Richtung ac und bc von a und b ausgehenden Strahlen, ehe sie das Auge treffen, so abgelenkt, dass sie in den Richtungen $a''c$ und $b''c$ in das Auge zu kommen scheinen; sie bilden bei c einen Winkel β mit einander[1]). Im Verhältniss β/α erscheint uns daher bei Einschaltung der Linse der Gegenstand vergrössert. Verlängern wir die in der Richtung $a''c$ und $b''c$ auffallenden Strahlen, bis sie eine bei ab senkrecht zu der Verbindungslinie zwischen dem Auge und dem Gegenstande ab gelegte Ebene schneiden, so geschieht dies in den Punkten a' und b'. Durch die Linsen erscheint uns also ein Gegenstand ab gerade so gross, wie ohne dieselbe ein Gegenstand $a'b'$ in derselben Entfernung. ab erscheint also im Verhältniss $a'b'/ab$ vergrössert, dies ist nahe gleich β/α.

Beim Betrachten mit dem Fernrohr befindet sich der betrachtete Gegenstand ab in einer gegebenen Entfernung, wir vergleichen daher die scheinbare Grösse $a'b'$ mit der wirklichen von ab, wenn letzteres sich an seinem wahren Orte befindet. Gegenstände, die wir beliebig dem Auge nähern können, bringen wir in die deutliche Sehweite, wir vergleichen bei der Untersuchung mit der Lupe und dem Mikroskop die scheinbare Grösse mit derjenigen, welche sie in dieser haben.

Blicken wir auf einen Maassstab gleichzeitig durch ein Fernrohr und mit dem unbewaffneten Auge, und fallen auf x Theile des direct gesehenen y Theile des durch das Fernrohr gesehenen Maassstabes, so ist die Vergrösserungszahl

$$V = x/y.$$

Blicken wir gleichzeitig durch eine Lupe oder ein Mikroskop, unter dem ein Maassstab liegt, und direct auf einen ebensolchen Maassstab in der Entfernung der deutlichen Sehweite und fallen auf x_1 Theile des direct gesehenen y_1 Theile des durch das Mikroskop gesehenen Maassstabes, so ist die Vergrösserungszahl

$$V_1 = x_1/y_1.$$

a) Fernrohr.

Einleitung. Bei den aus Linsen zusammengesetzten (den dioptrischen) Fernrohren (diejenigen, bei denen neben Linsen auch Hohlspiegel verwendet werden, die katoptrischen Fernrohre behandeln wir nicht) unterscheidet man folgende Haupttypen:

1. Das astronomische oder Kepler'sche Fernrohr (Fig. 163): Durch eine Convexlinse o (Objectiv) mit grosser Brennweite wird von dem Gegenstande AB ein umgekehrtes, verkleinertes, reelles

---

[1]) Die Zeichnung ist nur schematisch, die Art der Ablenkung durch die Linse ist nicht angedeutet.

Bild ab entworfen und dieses durch eine zweite Convexlinse v (Ocular) mit kurzer Brennweite wie durch eine Lupe betrachtet. Das Auge sieht ein umgekehrtes vergrössertes Bild $a'b'$.

2. Das **terrestrische** Fernrohr (Fig. 164 stellt nur das Ocularende dar). Dasselbe hat, wie das astronomische Fernrohr, eine Sammellinse als Objectiv; von ihr wird das umgekehrte Bild ab des Gegenstandes erzeugt. Anstatt dieses durch eine einfache Linse zu betrachten, schaltet man zwei Convexlinsen r und s von gleicher Brennweite ein; durch dieselben wird von ab ein gleich grosses, aber aufrecht stehendes Bild $a'b'$ erzeugt; dieses wird durch t wie durch eine Lupe betrachtet. Das Auge sieht ein aufrechtes vergrössertes Bild.

Fig. 163.

Fig. 164.

Fig. 165.

3. Das **holländische** oder **Galilei'sche** Fernrohr (Opernglas Fig. 165): Durch eine Convexlinse o (Objectiv) werden die von den verschiedenen Punkten des Gegenstandes AB divergirenden Strahlen convergent gemacht, so dass sie ein reelles, umgekehrtes verkleinertes Bild ab liefern würden. Ehe sie sich jedoch daselbst vereinigen, werden sie durch eine dazwischen geschaltete Concavlinse v (Ocular) wieder divergent gemacht. Das Auge empfängt z. B. die von A ausgegangenen Strahlen, als ob sie von a' ausgegangen wären: das Auge

sieht ein aufrecht stehendes, vergrössertes Bild. Dadurch wird das Fernrohr verhältnissmässig kurz.

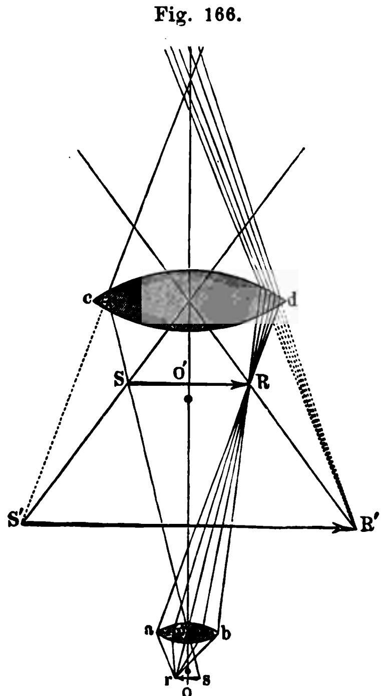
Um die Randstrahlen abzublenden, sind in den Fernrohren an geeigneten Stellen Diaphragmen (S. 266) eingesetzt; statt einfacher Linsen verwendet man achromatische und aplanatische Linsensysteme (S. 266).

Da bei dem astronomischen und dem terrestrischen Fernrohr ein reelles Bild entsteht, so kann man zu Messungen ein in der Bildebene angebrachtes Fadenkreuz verwenden, mit dem man die Lage des Bildes bestimmt.

Uebung. 1) Man richtet ein Fernrohr auf ein entferntes Fenster oder auf einen verticalen Maassstab in ca. 4 bis 6 m Entfernung, der aus 10 cm breiten, abwechselnd weissen und schwarzen Feldern besteht.

2) Man sieht mit dem einen Auge durch das Fernrohr, mit dem anderen neben demselben vorbei direct nach dem Gegenstande, und schliesst abwechselnd das eine und das andere Auge, um in beiden Fällen das Bild sicher zu sehen.

Fig. 166.



3) Man sieht mit beiden Augen gleichzeitig nach dem Gegenstande und sucht beide Bilder gleichzeitig zu sehen.

4) Man bestimmt, wie viel Abstände zwischen je zwei Fenstersprossen im direct gesehenen Bilde in den Abstand zweier Sprossen in dem durch das Fernrohr gesehenen Bilde fallen, resp. wie viele weisse und schwarze Felder in dem direct gesehenen Bilde einem Felde in dem durch das Fernrohr gesehenen entsprechen.

b) Mikroskop.

Einleitung. Durch die stark gekrümmte Convexlinse ab (Fig. 166) von kurzer Brennweite (Objectiv) wird von dem kleinen ausserhalb der Brennweite, aber nahe derselben liegenden Gegenstande rs ein vergrössertes, umgekehrtes, reelles Bild $R\ S$ entworfen. Dieses entsteht innerhalb der Brennweite der Convexlinse cd (Ocular) und wird durch diese wie durch eine Lupe betrachtet. Das Auge sieht ein vergrössertes, umgekehrtes, virtuelles Bild $R'\ S'$.

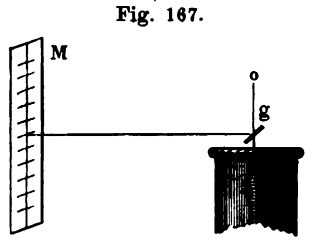
Bezüglich der Diaphragmen und Linsensysteme vergl. oben.

Zur Bestimmung der Vergrösserungszahl des Mikroskopes dienen zwei Methoden, bei beiden wird eine in $1/n$ mm, z. B. in $^1/_5$ mm getheilte Glasplatte auf den Objecttisch des Mikroskopes gelegt.

Erste Methode. Man legt eine Millimeterscala horizontal in die deutliche Sehweite vor das Mikroskop und verfährt genau wie bei der Bestimmung der Vergrösserungszahl des Fernrohres.

Zweite Methode. 1) Man bringt eine unter 45° gegen die Horizontale geneigte Glasplatte g (Fig. 167) oder einen Spiegel, dessen Belegung in der Mitte fortgenommen ist und der das Licht nach oben reflectirt, über das Ocular, stellt einen verticalen Maassstab M in 25 cm Entfernung vom Mikroskope auf, blickt durch das Ocular von o aus auf die getheilte Glasplatte auf dem Objecttisch und verschiebt den Maassstab, ohne seine Entfernung vom Mikroskop zu ändern, so lange hin und her, bis man den gespiegelten Maassstab und die getheilte Glasplatte gleichzeitig sieht. Dabei ist die Beleuchtung der getheilten Glasplatte so einzurichten, dass die Helligkeit des einen Objectes die des anderen nicht zu sehr übertrifft. Zweckmässig neigt man den Beleuchtungsspiegel des Mikroskopes so, dass die Striche der getheilten Glasplatte hell auf dunklem Grunde erscheinen.

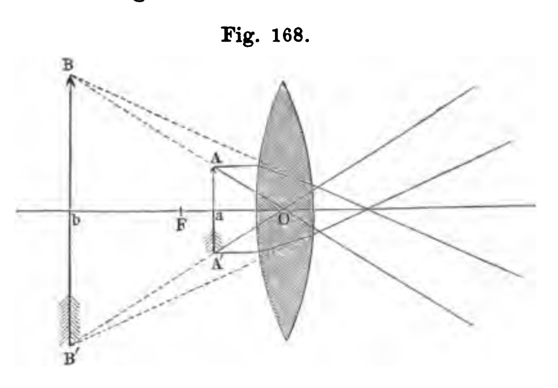
Fig. 167.



2) Man bestimmt an der verticalen Scala die Zahl der Theilstriche des Maassstabes, welche auf $1/n$ mm, wie er im Mikroskop erscheint, kommen. Ist x die Zahl der Millimeter-Theilstriche, so ist die Vergrösserung $= n\,x$.

Bemerkung. Zur Beurtheilung der Güte des Mikroskopes verwendet man sog. Prüfungsobjecte (Testobjectes). Dieselben bestehen entweder in einem feinen, auf Glas getheilten Gitter, durch welches die Platte in eine grosse Zahl sehr kleiner Quadrate getheilt ist, oder in feinen, auf Glas geritzten Scalen, oder aus Objecten aus dem Pflanzen- oder Thierreiche mit feiner Structur, z. B. von Diatomeen. Bei den Gitter- und Scalenobjecten müssen die Linien bis zum Rande hin scharf und geradlinig erscheinen, also wie in Fig. 169 und nicht wie in Fig. 170 oder Fig. 171. Man beurtheilt die „auflösende Kraft“

Fig. 168.



des Mikroskopes nach den Einzelheiten, die man mit demselben noch deutlich unterscheiden kann.

c) Lupe (Fig. 168 a. v. S.).

Einleitung. Bei der Lupe bringen wir den Gegenstand AA' sehr nahe an das Auge, so dass derselbe unter einem sehr grossen Winkel erscheint. Die von jedem Punkte desselben auf das Auge fallenden Strahlen besitzen dann aber eine zu grosse Divergenz, als dass die brechenden Medien des Auges sie auf der Retina zu einem Punkte vereinigen könnten. Wird eine Sammellinse O zwischen Auge und Gegenstand so eingeschaltet, dass der Gegenstand sich an einer bestimmten Stelle zwischen Brennpunkt F und Linse befindet, so vermindert sich die Divergenz der Strahlen so, dass sie aus der deutlichen

Fig. 169.

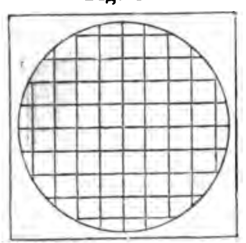


Fig. 170.

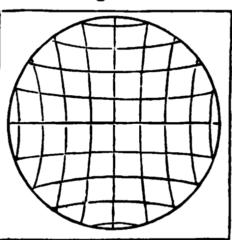
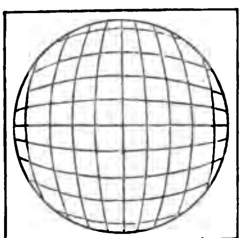


Fig. 171.



Sehweite zu kommen scheinen. Das Bild BB' in der deutlichen Sehweite ist virtuell. Der Winkel, unter dem dasselbe erscheint, bleibt derselbe wie bei directer Betrachtung. Die Vergrösserung V ist das Verhältniss der Grösse des virtuellen Bildes BB' zur Grösse des Objectes AA'. Denn wollten wir den Gegenstand ohne Lupe sehen, so müssten wir ihn in deutliche Sehweite bringen.

Hält man die Lupe sehr nahe vor das Auge, ist $\varDelta = 25$ cm die deutliche Sehweite, φ die Brennweite der Lupe, so lässt sich berechnen:

$$V = \varDelta/\varphi + 1.$$

Uebung. 1) Für eine Linse wird die Brennweite φ nach der Methode A. a), S. 264 bestimmt und damit V berechnet.

2) Um die Vergrösserung nach der zweiten bei dem Mikroskop angegebenen Methode zu ermitteln, befestigt man über derselben eine kleine Glasplatte unter 45° gegen die Axe der Linse geneigt. Man vergleicht die gefundene und berechnete Vergrösserung.

Beispiel: 1) $\varphi = 8$ cm; berechnet $V = 4$. 2) Von einer durch die Lupe betrachteten Millimeterscala erschien die Länge von 5 mm ebenso gross, wie die Länge von 2 cm der um die deutliche Sehweite vom Auge entfernten und durch die Glasplatte gespiegelten Scala; also auch hier $V = 4$.

VI. Spectralanalyse.

Gebraucht wird: Gaslampe; Bunsenbrenner; Platinlöffel für Chlornatrium und -lithium (s. S. 276); Chlornatrium und -lithium; blaues und rothes Glas; Spaltvorrichtung; Sammellinse; Prisma auf Tischchen; weisser Schirm.

Spectroskop mit gerader Durchsicht mit Vergleichsprisma; Stativ dazu; Kirchhoff-Bunsen'scher Spectralapparat; Unterlegklotz, welcher den Spectralapparat in die Augenhöhe bringt, mit Träger für die zur Beleuchtung der Scala dienende Lichtquelle und einen verstellbaren Träger für den Bunsenbrenner und Platindrahthalter.

Bunsenbrenner und Terquembrenner; Stativ für Reagensgläser; Probirglasständer mit 12 Präparaten (s. S. 287).

Coordinatenpapier: Reissbrett; kleines Inductorium mit zwei Tauchelementen und Verbindungsdrähten; Geissler'sche Röhren mit H, Hg, N, O, CO_2, $HgCl_2$, $HgBr_2$, HgJ_2 und Stativ dazu. Halter für Metallspitzen; Leydener Flasche, Metallspitzen, Fulgurator für Flüssigkeiten; Quarzlinse, Uranglasplatte, Stativ für beide (Fig. 182); Chininschirm.

Gemische mehrerer Chloride für qualitative Analyse.

Fortsetzung s. w. u. bei Absorptionsspectralanalyse.

1. Einleitung.

Die Spectralanalyse hat die Aufgabe, einerseits zu untersuchen, in welcher Weise die Aussendung von Licht stattfindet, von welchen Umständen die Wellenlänge und die Intensität des ausgesandten Lichtes abhängt, andererseits zu bestimmen, ob Lichtstrahlen von Körpern absorbirt werden und wie die Wellenlänge und die Menge des absorbirten Lichtes von den verschiedensten Umständen bedingt ist.

Um diese Aufgabe zu lösen, zerlegen wir das zu untersuchende Licht in ein Spectrum, d. h. wir breiten die in den Strahlen desselben enthaltenen, über einander gelagerten Lichtbewegungen von verschiedener Wellenlänge neben einander aus.

Das Spectrum des von einem leuchtenden Körper ausgesandten Lichtes nennen wir sein Emissionsspectrum; lassen wir dagegen das von einem weissglühenden Körper ausgesandte Licht durch einen Körper hindurchgehen, so nennen wir das Spectrum des hindurchgegangenen Lichtes das Absorptionsspectrum des letzteren; in diesem sind die Strahlen, die der Körper absorbirt, geschwächt oder sie fehlen ganz.

Da verschiedene Körper sowohl verschiedene Emissions- als auch verschiedene Absorptionsspectra zeigen, so können wir dieselben zur

Unterscheidung der Substanzen verwenden und sprechen daher von einer Spectralanalyse.

2. Lichtquellen.

Die zur Verwendung kommenden Lichtquellen sind folgende:

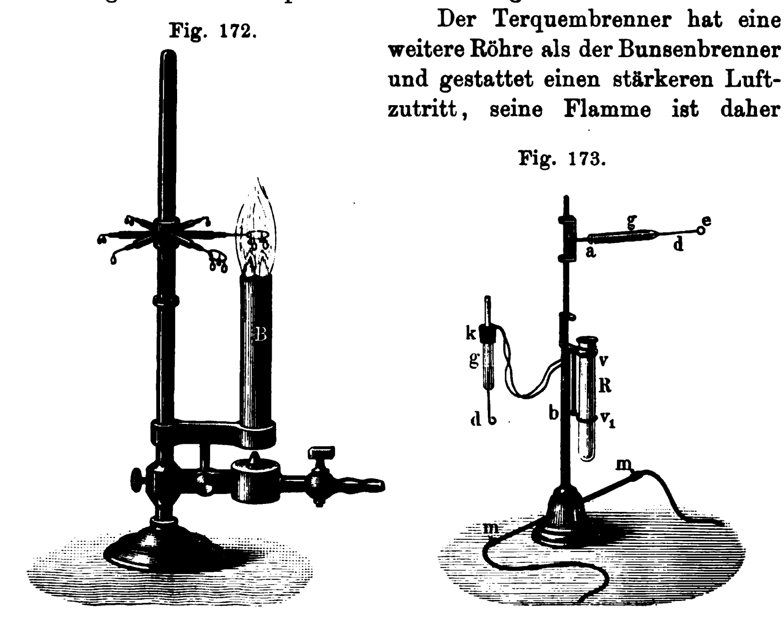
1. Die Sonne, Kalk- oder Zirkonlicht, das Gasglühlicht in seinen verschiedenen Formen, das elektrische Licht sowohl von Bogenlampen wie von Glühlampen, die leuchtende Gasflamme, alle senden nahezu weisses Licht mit einem continuirlichen Spectrum aus.

2. Die in dem Bunsen- resp. Terquembrenner (Fig. 172) zum Leuchten gebrachten Dämpfe fester oder flüssiger Substanzen.

Der Terquembrenner hat eine weitere Röhre als der Bunsenbrenner und gestattet einen stärkeren Luftzutritt, seine Flamme ist daher

Fig. 172.

Fig. 173.



heisser; die Röhre ist, um ein Zurückschlagen der Flamme zu vermeiden, an ihrem oberen Ende durch ein aufgesetztes Blechkreuz in vier Theile getheilt. Durch Heben oder Senken des Rohres *B* regelt man den Luftzutritt. Die Flamme ist am heissesten unmittelbar über dem inneren grünlichen (viertheiligen) Kegel.

Die Substanzen werden meist an Platindrähten in die Flamme eingeführt. Chlornatrium wird z. B. an dem Ende *e* (Fig. 173) eines zu einer Oese [1]) umgebogenen Platindrahtes *d* angeschmolzen, der in eine enge Glasröhre *g* eingeschmolzen ist. Man pulvert geschmolzenes Chlornatrium, befeuchtet den Draht, berührt mit ihm das Chlornatrium,

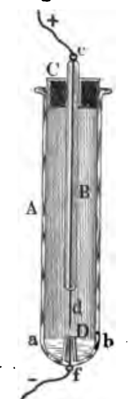
[1]) Will man längere Zeit mit demselben Salz beobachten, so bringt man dasselbe in einen durchlöcherten Platinlöffel, der an einem Platindraht befestigt ist.

hält ihn dann in die Flamme und schmilzt das anhaftende Salz zu einer Perle. Das Glasrohr *g* wird über den an einem Stativ *b* auf- und abschiebbaren Arm *a* geschoben. Man bringt die Perle stets in den vorderen Saum der Flamme des Bunsenbrenners (die Temperatur ist dort 1100 bis 1700⁰).

Die Salze sind in 10 mm weiten und 100 mm langen Reagirgläsern enthalten, Fig. 173, die am oberen Ende bei *v* aufgewulstet sind; hier ist ein Bindfaden herumgebunden, der dann mit seinem anderen Ende an einem Kork *k* befestigt ist, welcher in das Reagirglas *R* hineinpasst und durch den das den Draht *d* tragende Glasrohr *g* hindurchgeht.

Fig. 174.

Fig. 175.



An dem Stativ sind zwei Ringe v, v_1 angebracht, in die das Reagirglas mit der zu untersuchenden Substanz eingesetzt wird.

Um die Substanzen zur Beobachtung in die Flamme einzuführen und die Platindrähte stets an dieselbe Stelle zu bringen, ist in das Brett, auf welches der Bunsenbrenner bei dem Versuche gestellt wird, ein Stift eingeschlagen, der in ein in den Fuss *f* des Trägers, Fig. 173, gebohrtes Loch hineinpasst. Mit den Schnüren an den Armen *mm*, welche bis zum Beobachter hinführen, dreht man den Fuss und bringt damit den Draht in die Flamme, die vor dem Spalt steht, hinein oder aus derselben heraus. Ein zweiter als Anschlag dienender Stift verhindert, sobald das erstere der Fall ist, die weitere Drehung.

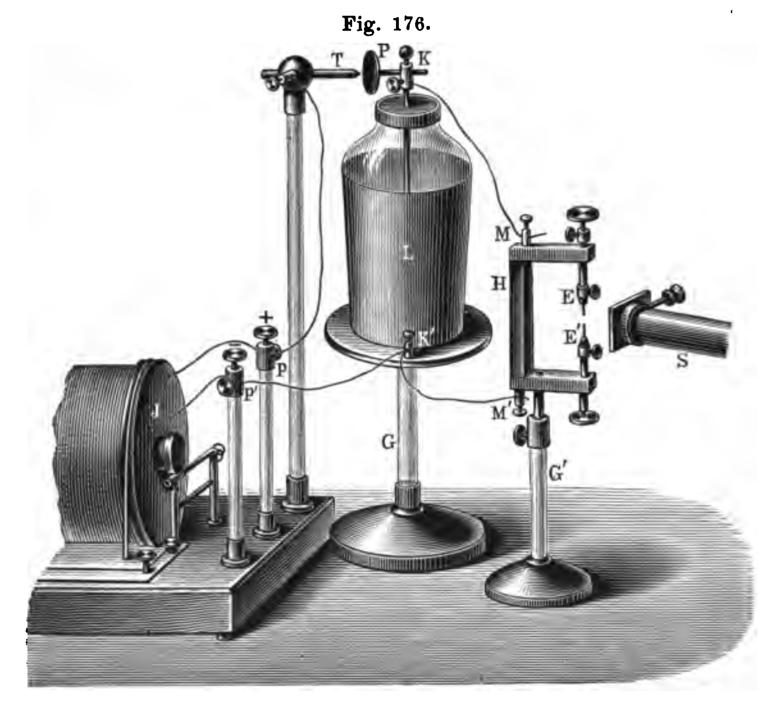
3. Die unter der Einwirkung elektrischer Entladungen leuchtenden verdünnten Gase und Dämpfe; sie sind in den Geissler'schen Röhren enthalten. Zwischen zwei weite Röhren a_1 und b_1, Fig. 174, ist ein Capillarrohr eingesetzt; in die Enden der weiten Röhren sind Platindrähte *a*, *b* [die Elektroden (Anode die mit dem + Pol, Kathode die mit dem — Pol verbundene)] eingeschmolzen, welche an ihren Enden im Inneren der Röhren Aluminiumdrähte tragen. Ueber die nach aussen gehenden Enden der Platindrähte sind Messingkappen gekittet.

4. Salzlösungen, welche unter dem Einfluss elektrischer Entladungen in dem Fulgurator (Fig. 175) verdampft und zum Leuchten gebracht werden. In ein Reagensglas *A* ist unten bei *f* ein Platindraht eingeschmolzen, der mit dem einen Pol eines Inductionsapparates in Verbindung gesetzt wird. Ueber *f* ist das conische Glasröhrchen *D* geschoben. Es wird nur so viel Salzlösung eingegossen, dass sie durch die in *D* wirkenden Capillarkräfte bis zur Spitze von *D* emporgehoben wird. Der unteren Platinspitze steht ein Platindraht gegenüber, welcher

bis auf sein unteres freies Ende *d* in eine Glasröhre *B* eingeschmolzen mit demselben in den Kork *c* gesteckt ist und welcher mit dem anderen Pole des Inductionsapparates in Verbindung steht.

5. Metalldämpfe, welche dadurch erzeugt und zum Leuchten gebracht werden, dass man elektrische Funken zwischen Spitzen aus dem betreffenden Metalle überspringen lässt. Die Metallspitzen *E* und *E'* (Fig. 176) sind in dem Halter *H* von Hartgummi befestigt und mittelst der Klemmschrauben *M* und *M'* durch Drähte *MK* und *M'K'*, welche mit Kautschuk überzogen sind, mit der inneren und äusseren Belegung der Leydener Flasche *L* verbunden. Die Flasche wird durch das Inductorium *J* geladen, und zwar ist die äussere Belegung der Flasche direct durch den Draht *K'p'* mit dem — Pol des

Fig. 176.



Inductoriums verbunden. Der + Pol ist mit der isolirt aufgestellten Spitze *T* leitend verbunden. Von dieser springen Funken auf die mit dem inneren Beleg verbundene Platte *P* über.

Ehe man neue Metallspitzen bei *E* und *E'* einsetzt, ist die Flasche mittelst eines Entladers zu entladen.

3. Vorübung: Entwerfen eines Spectrums.

Uebung. I. 1) Man stellt eine Lampe vor den vertical stehenden Spalt *A* (Fig. 177).

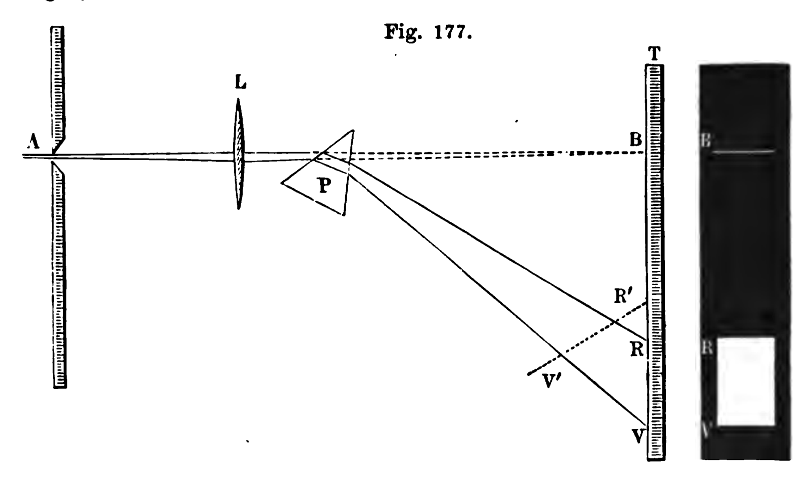
2) Auf einem Schirm *T* wird durch die Linse *L* ein scharfes Bild des Spaltes *A* entworfen.

3) Man bringt das Prisma *P*, dessen brechende Kante parallel dem Spalt steht, in den Gang der Strahlen; dieselben werden nach *R* abgelenkt, zugleich wird das weisse Licht der Lampe in seine farbigen Bestandtheile zerlegt. Das auftretende Farbenband ist das Spectrum des weissen Lampenlichts.

4) Man dreht das Prisma um seine Kante, bis die Ablenkung der Strahlen ein Minimum ist (vergl. S. 239 u. 244).

5) Man stellt den Schirm so (entsprechend der Linie *R'V'* der Figur), dass alle Theile des Spectrums gleich scharf erscheinen, was

Fig. 177.



man am besten nach dem Aussehen der oberen und unteren Kante beurtheilt; dazu muss der Schirm in den blauen Theilen des Spectrums dem Prisma erheblich näher stehen, als in den rothen (in Folge der chromatischen Abweichung der benutzten Linse, s. u. „Linsen").

An dem so erhaltenen Spectrum ist auf Folgendes zu achten:

a) Das weisse Licht besteht aus den Farben (Regenbogenfarben): Roth (*R'*), Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett (*V'*) (Fig. 116). Das Roth (*R'*) ist am wenigsten abgelenkt, das Violett (*V'*) am stärksten.

b) Die weiss glühenden Kohlentheilchen des Gaslichtes liefern eine ununterbrochene, durch stetige Uebergänge mit einander verbundene Farbenfolge: continuirliches Spectrum.

c) Die Spaltbilder erstrecken sich nicht geradlinig von oben nach unten, sondern sind gekrümmt, die mittleren Theile sind weniger abgelenkt, als die oberen und unteren; daher ist das Spectrum auch nicht an seinen Grenzen im Roth und Violett durch gerade Linien begrenzt.

6) Man macht den Spalt enger; das Spectrum wird lichtschwächer, aber auch reiner, die Farben treten deutlicher hervor.

7) Man hält quer über den Spalt einen Draht, im Spectrum erscheint eine horizontale dunkle Linie. Ebensolche dunkle Linien treten bei engem Spalt von selbst auf, sie rühren von Staubpartikelchen u. s. f. auf dem Spalt her.

II. Man ersetzt die Flamme durch die nicht leuchtende Flamme des Bunsen'schen Brenners und bringt Chlornatrium oder Chlorlithium in dieselbe. Man sieht beim Natrium eine gelbe, beim Lithium eine rothe Linie. Die leuchtenden Metalldämpfe geben Linienspectra, discontinuirliche Spectra.

Die bisher betrachteten Spectra sind Emissionsspectra.

III. 1) Man stellt die Gaslampe vor den Spalt und entwirft ein continuirliches Spectrum auf dem Schirm.

2) Man bringt ein violettes Glas zwischen Lampe und Spalt, es treten dunkle Streifen in dem Spectrum auf; das Glas „absorbirt" Strahlen von bestimmter Wellenlänge.

Das erhaltene Spectrum ist ein Absorptionsspectrum.

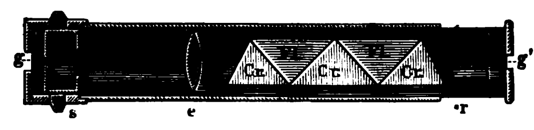
4. Die Spectralapparate.

Man unterscheidet Spectralapparate mit gerader Durchsicht und solche mit Ablenkung.

I. Spectroskope mit gerader Durchsicht (Spectroskope à vision directe). Beschreibung und Einstellung.

Bei ihnen erfährt ein Strahl aus den mittleren Theilen des Spectrums keine Ablenkung, während die rothen und blauen nach entgegengesetzten Seiten abgelenkt werden. In ihrer einfachsten Form bestehen diese Spectroskope aus einer Messingröhre, in welche bei g (Fig. 178) ein Spalt eingesetzt ist; die von diesem kommenden Strahlen gehen durch eine Linse e; die Prismencombination CrFl (Crown-Flintglas) zerlegt die Strahlen in ihre Bestandtheile. Hinter g' befindet sich das Auge. Die Verengerung und Verbreiterung des Spaltes wird durch eine Kreisschraube s bewirkt.

Fig. 178.



Diese Spectroskope können in dieser Gestalt nicht zu Messungen verwendet werden, sondern nur zu Beobachtungen und eventuell zu Vergleichungen, falls man vor die eine Spalthälfte ein Vergleichsprisma (s. w. u.) bringt.

Man stellt den Apparat dadurch ein, dass man ihn gegen den Himmel richtet und das Rohr r so lange verschiebt, bis man die in dem Spectrum auftretenden dunklen Linien, die Fraunhofer'schen Linien (Fig. 116), scharf sieht.

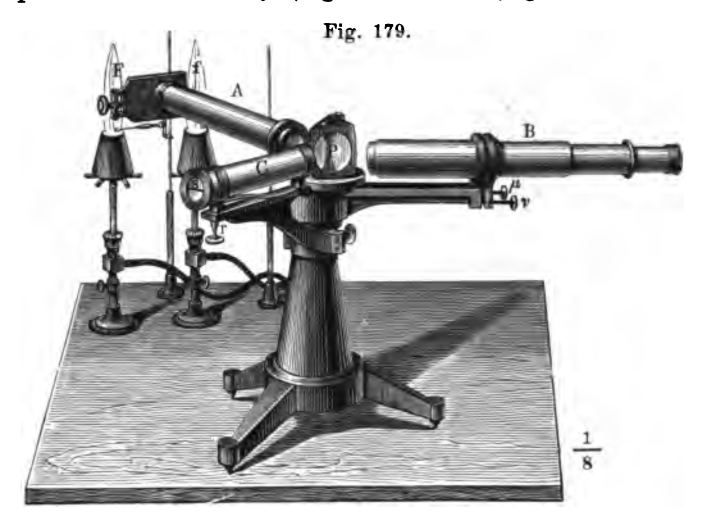
II. Spectralapparat mit Ablenkung nach Bunsen und Kirchhoff (Fig. 179 bis 181).

a) Beschreibung.

Dieser Spectralapparat hat folgende Bestandtheile:

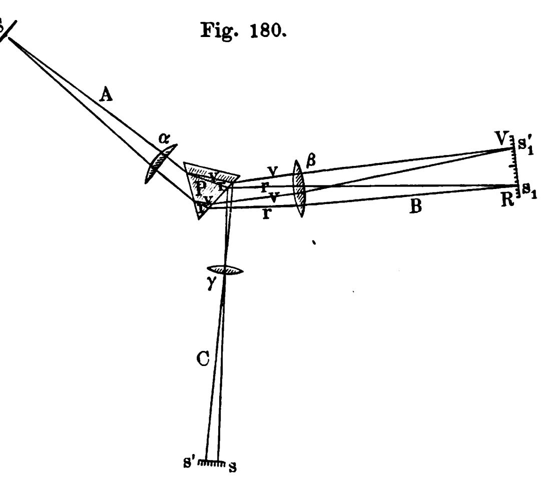
1. Das Collimatorfernrohr: Die Strahlen, welche durch den Spalt S in der Platte f (Fig. 179 bis 181) gehen, durchsetzen

Fig. 179.



das Rohr A und werden durch die Linse α (Fig. 180) parallel gemacht; der Spalt S befindet sich in dem Brennpunkte der Linse α. Die Breite des Spaltes kann durch eine Schraube verändert werden. Ueber die Mitte desselben ist horizontal ein dünner Platindraht gespannt; etwa in den Spalt sich setzender Staub wird mit einem Pinsel aus Dachshaaren entfernt. Wird der Apparat nicht gebraucht, so setzt man über den Spalt eine Kappe aus Pappe oder Messing. Untersucht man stark spritzende Salze, so bringt man vor den Spalt noch ein dünnes Glimmerblättchen.

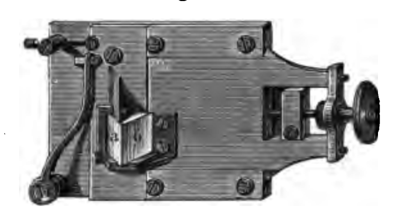
Fig. 180.



Vor der einen Hälfte des Spaltes kann ein Vergleichsprisma *ab* (Fig. 181) befestigt werden, durch das man vermöge totaler Reflexion von der Seite her Licht einfallen lässt, während durch die andere Hälfte das Licht direct hindurchgeht.

2. Die aus α austretenden Strahlen fallen auf die Vorderfläche des Prismas *P*, wo sie in ihre Bestandtheile roth bis violett, *r* und *v*, zerlegt werden; durch das Prisma geht also eine Schaar von Strahlen; die einer jeden Farbe zugehörigen verlaufen unter sich parallel, die verschiedenen Farben zugehörigen Bündel sind aber verschieden stark abgelenkt. An der zweiten Fläche des Prismas erfahren diese Strahlen eine zweite Brechung, und es tritt aus derselben wieder eine Reihe paralleler, verschieden gerichteter und verschieden gefärbter Strahlenbündel aus.

Fig. 181.



3. Das Beobachtungsfernrohr *B* nimmt mit seiner Objectivlinse β diese Bündel auf und vereinigt jedes derselben zu einem Spaltbilde in seiner Brennebene. In dieser liegen die verschiedenen Farben neben einander; das Roth zunächst der brechenden Kante, das Violett am weitesten von derselben abgelenkt. Das Spectrum wird mittelst einer Lupe, dem sogenannten Ocular, betrachtet. Die Lage der einzelnen Theile des Spectrums wird mittelst eines in der Brennebene der Linse β angebrachten Fadenkreuzes bestimmt.

4. Das Scalenfernrohr *C* dient dazu, die Lage der verschiedenen im Spectrum auftretenden Erscheinungen zu bestimmen. Eine kleine Lampe beleuchtet die auf Glas photographirte Scala ss', helle Striche mit Ziffern auf dunklem Grunde. Die von einem jeden dieser Striche ausgehenden Strahlen werden durch die Linse γ parallel gemacht, dann von der zweiten Fläche des Prismas nach dem Objectiv β des Beobachtungsfernrohres reflectirt und von diesem zu einem scharfen Bilde in der Brennebene vereint, und zwar so, dass sich entsprechen die Striche s der Scala und s_1 des Bildes und s' der Scala und s_1' des Bildes. Das durch das Ocular blickende Auge sieht also eine über das Spectrum gelagerte helle Scala. Die Lage der einzelnen Theile des Spectrums wird nach den Scalentheilen, auf welche sie fallen, bestimmt.

Fremdes Licht wird durch eine über das Prisma gesetzte Kappe aus Pappe mit drei Oeffnungen für die Fernrohre abgehalten.

Der Apparat muss zunächst eingestellt und die Angaben der Scala auf Wellenlängen reducirt werden.

b) Einstellung des Spectralapparates.

Uebung. 1) Das Beobachtungsfernrohr, das Collimator- und das Scalenfernrohr müssen auf Unendlich eingestellt werden.

Man schraubt das Beobachtungsfernrohr B aus seiner Fassung, stellt das Ocular so, dass man das Fadenkreuz scharf sieht, richtet B bei geöffnetem Fenster nach einem entfernten Gegenstande (Blitzableiter) und verstellt das Ocular mit dem Fadenkreuz gegenüber dem Objectiv so lange, bis man den Gegenstand scharf sieht (vergl. auch S. 242). Man macht nach einmaliger sorgfältiger Einstellung auf dem Rohr B eine Marke, welche die Einstellung desselben auf Unendlich bezeichnet.

2) Man schraubt B wieder an, nimmt das Prisma P fort, stellt vor den Spalt eine Gasflamme und stellt B dem Collimatorfernrohr gerade gegenüber. Hierauf verstellt man den Auszug mit dem Spalt, bis man Spalt und Fadenkreuz gleichzeitig scharf sieht, oder besser, bis bei einer Verschiebung des Auges vor dem Ocular Fadenkreuz und Spaltbild ihre gegenseitige Lage nicht ändern. Dann neigt man das Beobachtungsfernrohr durch die Schrauben μ und ν, bis die Mitte des Spaltes (der Draht) mit der Mitte des Fadenkreuzes des Beobachtungsfernrohres zusammenfällt.

3) Man setzt das Prisma wieder auf, stellt das Beobachtungsfernrohr auf das Spectrum ein, dreht das Scalenfernrohr zur Seite und verschiebt die Beleuchtungslampe desselben, bis man ihr Bild durch das Ocularfernrohr im Prisma reflectirt sieht, dann dreht man das Scalenfernrohr zwischen Prisma und Lampe, sofern diese nicht mit dem Scalenfernrohr selbst schon von vornherein fest verbunden ist. Man zieht das Rohr mit der Scala aus, bis die Striche scharf erscheinen, und senkt oder hebt die Scala mit der Schraube r (Fig. 179), bis das Bild in der Mitte des Spectrums gelegen ist. Dann dreht man den die Scala haltenden Auszug des Scalenfernrohres um seine horizontale Axe, bis die Scala horizontal erscheint und ihre Striche bei Beleuchtung des Spaltes mit einer Kochsalzflamme der gelben Na-Linie parallel sind.

4) Man macht den Spalt so breit, dass er, mit Natriumlicht beleuchtet, etwa halb so breit erscheint wie ein Scalentheil.

5) Eigentlich müsste noch die Kante des Prismas parallel zur Drehungsaxe gestellt werden und die Axen der Beobachtungsfernrohre senkrecht zu derselben; dies ist indess bei den Laboratoriumsapparaten bereits vom Mechaniker durch richtige Stellung des Tisches und des Collimatorfernrohres in hinlänglich genauer Weise ausgeführt.

Die anzustellenden Versuche zerfallen in drei Gruppen: erstens in qualitative, bestehend in einem Kennenlernen der Spectra, zweitens in quantitative, bestehend in dem Aichen des Spectralapparates und in dem Bestimmen einiger Wellenlängen mittelst der geaichten Scala, und drittens in wirkliche analytische Uebungen.

5. Aichen der Scala und Bestimmung der Wellenlänge der Linien des Wasserstoffs.

a) Aichen der Scala.

Man bestimmt die Lage der Linien der zu untersuchenden Körper auf der Scala und ermittelt dann die Wellenlängen derselben. Dies geschieht z. B. durch graphische Interpolation in folgender Weise.

Uebung. 1) Wir nehmen Coordinatenpapier (Dimensionen vergl. d. Beisp.). Die Bezifferung der horizontalen Abscissenaxe entspricht den Scalentheilen, diejenige der verticalen Ordinatenaxe den in Milliontel Millimetern ($\mu\mu$) ausgedrückten Wellenlängen (λ). Die letztere Bezifferung beginnt an der Abscissenaxe mit $\lambda = 400$ und reicht bis circa $\lambda = 800$.

2) Man bringt in den Bunsenbrenner Chlornatrium, dreht das Scalenrohr, bis die gelbe Na-Linie auf 50 steht [1]) und schraubt dasselbe in dieser Stellung fest; dasselbe hat dann stets dieselbe Lage gegenüber dem Prisma, daher bleiben die Coincidenzen der einzelnen Spectrallinien mit bestimmten Scalentheilen auch bestehen, wenn man das Beobachtungsfernrohr dreht, wovon man sich leicht überzeugt.

Auf der dem Punkte 50 der Abscissenaxe entsprechenden Ordinate bezeichnen wir den Punkt, welcher der Wellenlänge $\lambda = 589$ entspricht; dazu suchen wir auf der Ordinatenaxe den Punkt 589 und gehen auf der durch ihn gelegten Horizontallinie fort, bis wir die durch den Punkt 50 gehende Verticale treffen.

3) Man bringt andere Salze (s. folgende Tabelle) in die Flamme, welche Linien von bekannter Wellenlänge liefern, bestimmt die Lage (a) derselben auf der Scala und bezeichnet auf der dem Punkte a entsprechenden Ordinate die ihnen zukommenden Wellenlängen λ.

Sind die Linien relativ schwach, so nimmt man die Lampe vor der Scala fort oder schraubt sie nieder, stellt das Fadenkreuz auf die Linie ein, beleuchtet dann wieder und liest die Lage des Fadenkreuzes ab, seine Lage entspricht genau derjenigen der zu messenden Linie. Ferner hält man Strahlen, welche nicht gerade beobachtet werden, durch Vorsetzen geeigneter absorbirender Mittel ab, z. B. die blauen durch rothe Gläser bei Untersuchungen im Roth.

Benutzt werden folgende Substanzen mit den Wellenlängen:

---

[1]) Bei den meisten Spectralapparaten ist die Scala so eingerichtet, dass sie nahe der von Bunsen und Kirchhoff benutzten entspricht, wenn die Na-Linie auf 50 gelegt wird. Indess kann man auch jeden anderen Scalentheil zur Coincidenz mit der Na-Linie bringen, nur muss die Scala so liegen, dass man sie in allen Theilen des Spectrums benutzen kann. Die Scalenlage ist von Zeit zu Zeit mittelst der gelben Na-Linie zu controliren.

Kaliumchlorid	rothe Linie	K_α	$\lambda =$	768
	blaue „	K_β		405
Lithiumchlorid, rothe	„	Li_α		671
Natriumchlorid, gelbe	„	Na		589,3
Thalliumchlorid, grüne	„	Tl		535
Strontiumchlorid, blaue[1]	„	Sr_δ		461

4) Durch alle erhaltenen Punkte legt man aus freier Hand eine Curve. Auf dieser Curve bestimmt man die Wellenlänge, welche einem Scalentheile entspricht, indem man die ihm zugehörige Ordinate aufsucht.

Beispiel: Das von uns benutzte Coordinatenpapier ist 250 mm lang und 210 mm hoch. Die Abscissenaxe ist in 90 Theile getheilt; die jedem fünften entsprechende Linie ist stark ausgezogen und trägt der Reihe nach die Zahlen 0, 10 . . . 180. Die Ordinatenaxe ist in 80 Theile getheilt, von denen jeder zweite mit Ziffern versehen ist von 380, 390 . . . 780. Die den Theilen 400, 450, 500 . . . entsprechenden Linien sind stärker ausgezogen. Bei unserem Apparat entsprechen z. B. die folgenden Ablesungen a an der Scala den oben erwähnten einzelnen Wellenlängen λ in $\mu\mu$ (millionstel Millimeter).

	K_α	K_β	Li_α	Na	Tl	Sr_δ
a	17	159	32	50	68	108
λ	768	405	671	589,3	535	461

Nach diesen Angaben ist die Curve gezeichnet, welche auf Tafel I (S. 291) von links oben nach rechts unten durch die Punkte K_α, Li_α, H_α, Na, Tl, H_β, Sr_δ, In, K_β geht.

5) Man bestimmt die Grenzen der einzelnen Farben auf der Scala und sucht die ihnen entsprechenden Wellenlängen. Man erhält angenähert die S. 218 gegebenen Zahlen.

b) Ermittelung der Wellenlänge des Wasserstoffspectrums aus Ablesungen an der Scala.

Uebung. 1) Die Elektroden einer mit Wasserstoff gefüllten Geissler'schen Röhre werden mit den Polen eines Inductoriums verbunden. Von den Polen einer Batterie von zwei bis drei Chromsäuretauchelementen oder Accumulatoren führen Drähte zu den Klemmschrauben des Commutators.

2) Man schliesst den Strom und schlägt eventuell an den Neef'schen Hammer, wenn dieser nicht von selbst schwingt, der Wasserstoff im Rohre leuchtet roth. (Die zu den Elektroden führenden Drähte sind bei geschlossenem Strome nicht zu berühren, da man sonst elektrische Schläge erhält; gleich nach der Beobachtung ist der Strom wieder zu öffnen.)

3) Man stellt die Geissler'sche Röhre so vor den Spalt, dass sie diesem parallel steht und gleichzeitig in der Richtung der Axe des Collimators liegt; dazu visirt man über den Collimator nach der Röhre

[1]) Die Banden dieses Salzes im Roth und Gelb werden nicht benutzt.

hin. Man sieht im Apparate drei Linien, eine rothe α, eine blaugrüne β, eine violette γ. Ihre in der für schwache Linien angegebenen Weise bestimmten Lagen seien auf der Scala s_α, s_β, s_γ.

4) Man liest die s_α, s_β, s_γ entsprechenden Wellenlängen an der Curve ab (S. 284).

Es ist: $s_\alpha = 33{,}5$; $\lambda = 656\,\mu\mu$. $s_\beta = 92$; $\lambda = 486\,\mu\mu$. $s_\gamma = 128$; $\lambda = 434\,\mu\mu$ (vgl. Tafel I, 4, S. 291).

6. Emissionsspectra.

Einleitung. Ehe wir zu den Beobachtungen der Spectra selbst übergehen, schicken wir einige allgemeine Bemerkungen über diejenigen Punkte voraus, die bei denselben zu beachten sind.

Man unterscheidet drei Arten von Emissionsspectren.

1. Continuirliche Spectra; dieselben erstrecken sich über einen gewissen Bereich, ohne in einzelne Linien zu zerfallen. Dabei brauchen sie nicht alle Farben zu umfassen.

2. Banden- oder cannelirte Spectra; sie zeigen bei schwacher Dispersion breitere helle Theile des Spectrums, die sogen. Banden, meist mit einer scharfen Begrenzung an der einen, mit einer verwaschenen an der anderen Seite, manchmal sind auch beide Seiten verwaschen, z. B. bei Strontiumchlorid. Bei einseitiger, scharfer Begrenzung liegt diese bald nach dem Infraroth, bald nach dem Ultraviolett hin. Stärkere Dispersion zeigt oft, dass die Banden aus einer Reihe von Linien von nahezu gleicher Intensität bestehen, die nach dem scharfen helleren Rande immer näher zusammenrücken und dort nur schwer von einander getrennt werden können (vergl. das Spectrum des Bunsen'schen Brenners, S. 289). Indess giebt es auch Banden, die keine Auflösung in Linien gestatten.

3. Linienspectra; sie bestehen aus einzelnen, mehr oder weniger scharfen Linien, die durch dunkle Zwischenräume getrennt sind, oder sich von einem schwach erhellten Hintergrunde abheben.

Rühren die Spectra von Bewegungen her, welche von den Molecülen resp. den Atomen des Körpers ausgehen, so hängt die Natur der Schwingungen und ihre Intensität von dem Bau der Molecüle ab. Wir schreiben meist die Linienspectra den Schwingungen der einzelnen Atome, die Bandenspectra denen der Molecüle zu, indess treten auch bei Atomen Bandenspectra auf.

Jeder chemisch definirte Körper, jede Verbindung hat ihr eigenes Spectrum, ihr Verbindungsspectrum. Dieses Spectrum lässt sich natürlich nur dann beobachten, wenn die Verbindung bei derjenigen Temperatur, bei der eine Lichtemission stattfindet, noch existirt, resp. nicht durch chemische Processe, z. B. in der Flamme, in ihre Atome zerlegt wird oder irgend welche Umänderungen erfährt.

Ein Beispiel für Verbindungsspectra liefern die Verbindungen $SrCl_2$, $SrBr_2$, SrJ_2, welche mit dem Fulgurator in einer Wasserstoffatmosphäre und in der Bunsen'schen Flamme unter Beimischung von HCl, HBr, HJ zu den Gasen derselben oder bei Abkühlung derselben durch Einbringen von Ammoniumacetat neben den Salzen erhalten werden. Diese Spectra sind unter einander verschieden, es sind Verbindungsspectra. In einer gewöhnlichen Bunsen'schen Flamme erhitzt, liefern sie stets dasselbe Spectrum, das von Strontiumoxyd.

Der Charakter der Spectra ändert sich mit dem Aggregatzustande. Feste und flüssige Körper haben fast stets continuirliche Emissionsspectra, Gase haben Banden- oder Linienspectra.

Continuirliche Spectra, die nur einzelne Theile des Spectrums umfassen, zeigen die festen und flüssigen Körper, wenn sie fluoresciren oder phosphoresciren.

a) Emissionsspectra im Bunsen- bezw. Terquembrenner.

Uebungen. Die Spectra der im Folgenden mit ihren Linien etc. aufgeführten Metalle werden im Spectralapparat betrachtet und mit der Beschreibung verglichen, die den einzelnen Linien zukommenden Scalentheile abgelesen und die Spectra gezeichnet. Man zieht auf dem Coordinatenpapier, in welches die Curve eingetragen ist, welche die Abhängigkeit von Wellenlängen und Scalentheilen darstellt, eine Reihe von starken horizontalen Linien (bei unserem Papier sind die bei 400, 450 ... stärker ausgezogen) und theilt so die ganze Fläche in eine Reihe von Streifen, von denen jeder für das Spectrum eines Metalles bestimmt ist. Die Einzeichnung geschieht in zweierlei Art.

α) Man zeichnet in die obere Hälfte des Streifens die hellen Linien mit schwarzen Strichen da ein, wo die ihnen entsprechenden Scalentheile liegen; hellere Linien werden sehr schwarz gezeichnet, breite Banden schraffirt und durch die Schraffirung die Helligkeitsvertheilung angedeutet.

β) Man stellt die Helligkeitsvertheilung im Spectrum durch eine Curve dar. Den grösseren Intensitäten entsprechen grössere Ordinaten. Hierbei erscheint z. B. eine schmale Linie als eine steil ansteigende Curve, die ebenso schnell wieder herabsinkt, wie sie ansteigt. — In dieser Weise sind einige Spectra in die Streifen der Tafel I, S. 291, eingezeichnet. Bei dieser Art der Darstellung kann man die Wellenlänge jeder Linie ermitteln: Man verlängert die durch die eingezeichneten Linien gehenden Verticalen, bis sie die Curve $K_\alpha Na \ldots K_\beta$ schneiden, und liest in der oben angegebenen Weise direct die Wellenlänge ab.

Die hier erwähnten Metalle werden (Apparat vergl. S. 276) als leicht flüchtige Chloride in die Flamme gebracht.

1. Natrium. Sehr helle Linie im Gelb (α) $\lambda = 589{,}3\,\mu\mu$. Stärkere Dispersion löst sie in eine enge Doppellinie (D_1 und D_2 des

Sonnenspectrums s. w. u.) auf. Bei grossen Dampfmengen in der Flamme umgiebt die Linie ein heller Schein im Gelb und Grün, der sich zu beiden Seiten allmählich in dem dunklen Hintergrunde verliert. (Bei höheren Temperaturen treten zu der gelben Doppellinie noch andere Doppellinien im Grün etc. S. 292 hinzu.) — Die gelbe Natriumlinie tritt schon auf, wenn Spuren von einem Natriumsalze, besonders von NaCl vorhanden sind; sie zeigt sich daher in den Spectren aller Substanzen neben den diesen eigenthümlichen Linien.

2. Kalium. Breite Linie im äussersten Roth (α) $\lambda = 768\,\mu\mu$, zweite Linie im äussersten Violett (β) $\lambda = 404\,\mu\mu$. Dieselbe ist schwer zu sehen, weil das Auge für das äusserste Violett wenig empfindlich ist. Zur Bestimmung der Lage verfährt man, wie oben für schwache Linien (S. 284) angegeben ist. Zwischen beiden Linien erscheint bei grösseren Dampfmengen ein heller Schein, welcher etwa im Grün sein Maximum hat und gegen die Enden des Spectrums allmählich schwächer wird, ohne die Linien K_α und K_β selbst zu erreichen.

3. Lithium. Intensiv rothe Linie $\lambda = 671\,\mu\mu$.

4. Baryum giebt das Bandenspectrum des Oxydes: Vier intensiv grüne Banden, die gegen das Roth hin scharf begrenzt sind und sich nach dem Violett hin allmählich abschattiren. Ausserdem zeigt sich eine sehr helle blaue Bande. (Man lasse die Salzperle längere Zeit in der Flamme.)

5. Strontium giebt im Wesentlichen ein Bandenspectrum mit hellen, rothen und orangefarbenen Banden, die nach beiden Seiten gleich schnell abfallen. Dem Metalle, das durch Reduction der Verbindung entsteht, gehört nur die blaue Linie (δ) mit $\lambda = 461\,\mu\mu$ an.

6. Calcium. Eine charakteristische violette Linie $\lambda = 422{,}7$. Verwaschene Banden im Gelbgrün und Grün, darunter besonders eine sehr helle, welche an beiden Seiten verwaschen ist.

7. Indium. Intensiv blaue Linie (α) $\lambda = 451{,}1\,\mu\mu$ und eine weniger helle Linie (β) mit $\lambda = 410{,}2\,\mu\mu$ fast am Ende des Spectrums. Durch diese beiden Linien wurde das Indium entdeckt.

8. Thallium. Sehr helle, scharfe, grüne Linie $\lambda = 535{,}1\,\mu\mu$. Durch diese Linie wurde das Thallium entdeckt.

9. Kupfer. Sehr charakteristisches Bandenspectrum; dasselbe ist zu betrachten bei weiterem und bei sehr engem Spalte. Bemerkenswerth sind die Banden im Roth, Grün, besonders aber im Blau [hier ist sehr deutlich zu sehen, dass sie gegen das violette Ende zu scharf sind; sie sind paarweise angeordnet, jedes Paar besteht aus einer helleren breiteren Bande und einer brechbareren schmäleren („Rhythmus“ in der Anordnung der Banden)].

10. Blei. Banden im Grün und Blau.

11. Mangan. Zwei helle, grüne Banden, in denen bei engem Spalte die ersten von den Linien, aus denen sie zusammengesetzt sind,

hervortreten; die hellsten liegen an den dem Violett zugekehrten Enden; nach dem Roth hin folgen immer schwächer werdende Linien.

12. Magnesium. Verwaschene Bande im Grün.

13. Das Bandenspectrum der Kohle. Man stellt den Terquembrenner (Fig. 276) so vor den Spalt, dass bei reichlichem Luftzutritt der untere grüne Theil der Flamme vor der Mitte des Spaltes steht. Man sieht das „Swan-Spectrum", ein Bandenspectrum, welches früher Kohlenwasserstoffen zugeschrieben wurde, welches aber wohl dem Kohlenstoffe selbst zukommt. Im Roth sieht man mehrere schwache und unbestimmt begrenzte Banden; im Grüngelb beginnt die erste der charakteristischen Hauptbanden mit einer scharfen hellen Linie (ungefähr bei $\lambda = 570\,\mu\mu$), der zahlreiche, immer schwächer werdende Linien in sehr nahe gleichen Abständen folgen [Spalt eng!]. Jede Linie ist auf der brechbareren Seite von einem Lichtschein begleitet, und die Linien bilden eine nach dem Roth hin scharfe, nach dem Violett hin verwaschene Bande. Ebenso ist die zweite, eine sehr helle grüne Bande, zugesammengesetzt. Complicirter gebaut ist die dritte blaue Bande; einzelne Linien sind aber auch hier noch zu sehen. Unmittelbar auf eine schwächere indigofarbene Bande folgt nach völlig dunklem Zwischenraum die letzte violette Bande. Im Ultraviolett reiht sich an diese sichtbaren Banden eine Reihe ähnlich gebauter unsichtbarer Banden. Dieses Spectrum zeigen die meisten Kometen und eine Reihe von Fixsternen.

b) Emissionsspectra der Gase und Dämpfe unter dem Einflusse elektrischer Entladungen.

Die Versuchsanordnung ist dieselbe wie beim Wasserstoff (S. 285).

1. Wasserstoff giebt eine intensiv rothe Linie (H_α, $\lambda = 656{,}3\,\mu\mu$, die C-Linie des Sonnenspectrums); eine grünblaue (H_β, $\lambda = 486{,}1\,\mu\mu$, die F-Linie des Sonnenspectrums); eine blaue (H_γ, $\lambda = 434{,}0$, eine Linie in der Nähe von G des Sonnenspectrums) und eine nur schwer zu erkennende violette Linie (H_δ, $\lambda = 410{,}2\,\mu\mu$, h des Sonnenspectrums). Ausserdem treten oft rothe, gelbe, grüne und blaue Linien und Banden auf, welche zum grossen Theil von Spuren atmosphärischer Luft herrühren, zum Theil auch einem unter gewissen Bedingungen in der Entladungsröhre erscheinenden Bandenspectrum des Wasserstoffs angehören.

2. Stickstoff giebt ein sehr charakteristisches Bandenspectrum. Im Roth, Orange und Gelb zeigen sich etwa gleich weit von einander entfernte, einander sehr ähnliche Banden, welche nach beiden Seiten gleichmässig an Intensität abnehmen. Im Blau und Violett tritt eine Reihe von hellen Banden auf, die alle ihre scharfe Seite dem rothen Ende des Spectrums zuwenden. Alle diese Banden lösen sich bei stärkerer Dispersion in einzelne, ziemlich breite Linien auf.

Man stellt die Röhre so auf, dass die eine Elektrode vor dem Spalte steht, und macht dieselbe durch Umlegen des Commutators bald zur positiven Elektrode (Anode), bald zur negativen (Kathode). Auf der äussersten Spitze der Anode sitzt ein blassröthliches Lichtbüschel auf; das Spectrum desselben besteht aus denselben Banden, die auch im Lichte des Rohres auftreten, wenn auch mit etwas anderer Helligkeitsvertheilung. Die Kathode ist ihrer ganzen Länge nach in einen violetten Lichtmantel gehüllt, das sogen. „Glimmlicht“. Das Spectrum des Glimmlichtes zeigt vor Allem eine gelbgrüne, eine grüne und neben anderen schwächeren eine intensiv blaue Bande, die alle drei nach dem Roth zu scharf begrenzt sind. Ist das Rohr sehr weit ausgepumpt, so leuchtet die der Kathode benachbarte Glaswand mit grünlichem Fluorescenzlicht.

Bei sehr starken Entladungen, z. B. bei Einschaltung von Leydener Flaschen, verwandelt sich das Bandenspectrum des Stickstoffs in ein Linienspectrum.

3. Sauerstoff zeigt zwei intensiv rothe Linien und mehrere schwächere Banden im Grün und Blau.

4. Kohlensäure zeigt schwächere Banden im Roth und Orange, zwei sehr helle im Grün und mehrere im Grünblau und Blau, sämmtlich nach dem Roth hin scharf begrenzt.

5. Quecksilber. (Das Entladungsrohr ist etwas zu erwärmen!) Die Hauptlinie ist eine grüne (α) $\lambda = 546\,\mu\mu$. Im Gelb ist eine Linie (β) $\lambda = 579$ zu sehen (etwas brechbarer als die meist zugleich auftretende Natriumlinie, die von dem Natrium im Glase herrührt), welche bei engem Spalte als Doppellinie erscheint. Einen ähnlichen Anblick würde die gelbe Natriumlinie bei grösserer Dispersion gewähren (s. o. S. 287). Weiter ist eine violette Linie (γ) $\lambda = 576{,}9$ vorhanden.

6. Die Haloidverbindungen des Quecksilbers (Tafel I, a. S. 291) $HgCl_2$, $HgBr_2$, HgJ_2. Man verwendet dieselben in etwa 1,4 cm weiten und 15 cm langen, evacuirten Spectralröhren ohne capillaren Theil, welche einige Körner der betreffenden Substanzen $HgCl_2$, $HgBr_2$ und HgJ_2 enthalten.

Uebung. 1) Man bringt die Röhren vor den Spalt, erwärmt sie und schickt die Entladungen durch. Sie zeigen Spectra mit sehr charakteristischen Banden.

2) Man bestimmt die Wellenlängen der scharfen Ränder der Banden.

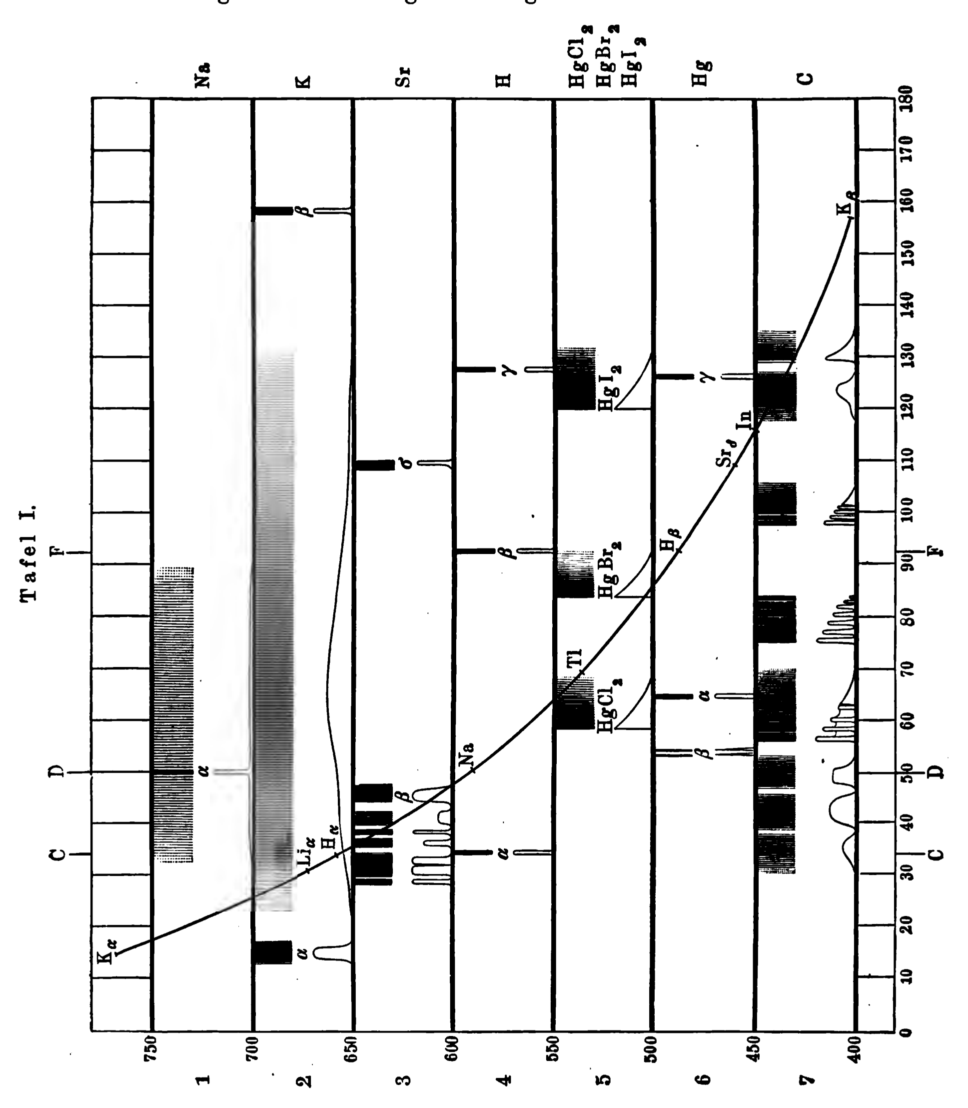
Das Chlorid zeigt eine grüne Bande (Rand ca. $\lambda = 564\,\mu\mu$); das Bromid eine grünblaue (Rand $\lambda = 503\,\mu\mu$); das Jodid eine indigofarbene (Rand $\lambda = 445\,\mu\mu$). Der Wellenlängenunterschied ist etwa

$$HgCl_2 - HgBr_2 = 59\,\mu\mu. \quad HgBr_2 - HgJ_2 = 60\,\mu\mu.$$

Wie die Moleculargewichte der drei Verbindungen sich um einen nahezu constanten Betrag unterscheiden, so auch die Wellenlängen dieser Banden.

c) Funkenspectra von Salzlösungen.

Uebung 1. 1) In einen Fulgurator (Fig. 175) wird eine concentrirte Lösung von Chlormagnesium gebracht und so vor den sehr



engen Spalt gestellt, dass die Strecke zwischen den Platinspitzen in der Mitte desselben steht.

2) Beim Durchgang der Entladungen sieht man die hellen Linien des Magnesiumspectrums, welches besonders durch drei dicht bei

einander stehende Linien im Grün ausgezeichnet ist. Solche Linientripel wiederholen sich mehrfach im violetten Theile des Magnesiumspectrums.

Uebung 2. Die gleiche Uebung wird mit einem zweiten Fulgurator angestellt, der eine concentrirte Chlornatriumlösung enthält. Man sieht je eine enge Doppellinie im Gelb, Grün und Blau. In den ultravioletten Theilen des Spectrums wiederholen sich solche Linienpaare noch mehrere Male.

Das Natriumspectrum ist also durch das Auftreten von Linienpaaren ausgezeichnet, das Magnesiumspectrum durch Linientripel. Diese mehrfachen Wiederholungen von regelmässigen Liniengruppen deuten auf gewisse Regelmässigkeiten in der Schwingungsweise der das Licht aussendenden Molecüle oder Atome, auf „harmonische Schwingungen“.

d) Funkenspectra der festen Metalle; lange und kurze Linien.

Uebung. 1) Die Seite 278 unter 5. beschriebene Vorrichtung *H* wird mit ihrem Fusse *G* in ein Stativ so festgeklemmt, dass die Spitzen *E* und *E'* horizontal in der Mitte des Spaltes stehen.

2) Man hält auf die Spaltplatte des Spectralapparates ein Blatt weissen Papiers, lässt die Funken überspringen und entwirft auf dem Papier mit einer Linse ein Bild des Funkens.

In dem Bilde entsprechen die mittleren hellsten Theile dem Inneren der Funkenbahn. Der schwächer leuchtende Hof entspricht der kälteren und dampfärmeren Hülle des Funkens.

3) Man sieht im Spectroskop die Linien des Metalles. Sie sind fast durchgängig in der Mitte breiter und spitzen sich nach beiden Enden hin zu. Dabei sind nicht alle gleich lang. Den langen Linien entsprechen diejenigen Strahlen, welche von dem leuchtenden Metalldampfe auch noch bei geringeren Dampfmengen und schon bei niedrigeren Temperaturen, daher auch in der Hülle der Funkenbahn in merklichem Grade, ausgesendet werden; es sind die Hauptlinien des Metalles. Die den kurzen Linien entsprechenden Strahlen werden bei hoher Temperatur, grosser Dampfmenge etc. ausgesendet.

4) Untersucht werden: Zn, Cd, Fe, Cu, Pb, Sn, Pt, Ag und die auftretenden Linien in die Curventafel eingezeichnet. Die allen Spectren gemeinsamen Linien rühren von der Luft her.

e) Die ultravioletten Spectra.

Uebung. 1) In den Halter *H*, Fig. 176 (S. 278) werden Cadmiumspitzen *EE'* eingesetzt. Dieselben werden vertical vor dem Ringe *R*, Fig. 182, aufgestellt, der sich in der Axe der Quarzlinse *LL* befindet.

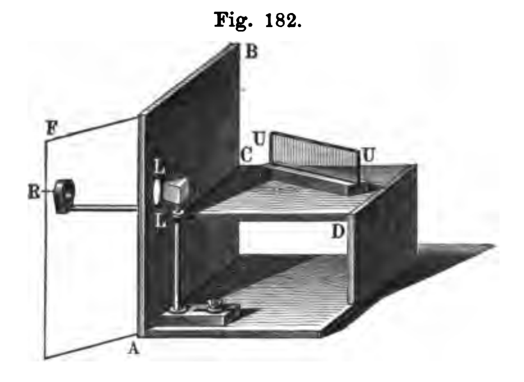
2) Man stellt hinter die Quarzlinse LL ein Quarzprisma, fängt wie auf S. 279 das Spectrum auf der Uranglasplatte UU auf und stellt das Prisma auf das Minimum der Ablenkung. Schirme halten das störende Nebenlicht ab.

3) Man fängt die nach dem Roth hin liegende Hälfte des Spectrums durch einen Papierstreifen ab. Auf der Uranglasplatte erscheint eine ganze Reihe von Linien, welche ausserhalb des auf dem Papierstreifen sichtbaren Spectrums liegen: ultraviolettes Spectrum.

Die ultravioletten Strahlen rufen an den Stellen des Uranglases, die sie treffen, Fluorescenz hervor und machen dieselben dadurch gewissermaassen selbstleuchtend.

Das ultraviolette Spectrum des Cadmiums ist besonders ausgezeichnet durch vier etwa gleich weit von einander abstehende Linien, ganz am Ende des Spectrums, $\lambda = 214$, 219, 227 und 231 $\mu\mu$; ferner tritt ein intensives Linienpaar näher dem Violett auf ($\lambda = 347$ und 340 $\mu\mu$).

Fig. 182.



4) Die Uebung wird wiederholt mit einem zur Hälfte mit einer Lösung von schwefelsaurem Chinin und etwas Gummi arabicum bestrichenen Schirm, ferner unter Anwendung der oben bei 4. genannten Metalle.

5) Man ersetzt die Cadmiumspitzen z. B. durch solche aus Zink, und erhält auf der Uranglasplatte ein ultraviolettes Spectrum, in dem besonders die drei äussersten Linien, $\lambda = 210$, 206 (eine enge Doppellinie) und 202 $\mu\mu$, auffallen.

6) Man hält vor L eine dicke Glasplatte: die äussersten ultravioletten Linien verschwinden. Das Glas absorbirt das äusserste Ultraviolett. Deshalb bestehen die optischen Theile des Apparates aus Quarz.

7) An Stelle des Chininschirmes wird eine mit Balmain'scher Leuchtfarbe bestrichene Papptafel gesetzt: Die vom Licht getroffenen Stellen leuchten in bläulichem Lichte. Nimmt man den Schirm fort, so leuchten die erregten Theile eine Zeit lang nach; diese Erscheinung nennt man Phosphorescenz.

Bemerkung. Alle diejenigen Leuchtprocesse, bei denen eine Lichtentwickelung stattfindet, die grösser ist als diejenige, welche der Temperatur der leuchtenden Theile entspricht, fasst man unter der gemeinsamen Bezeichnung „Luminescenzerscheinungen“ zu-

sammen. Dahin gehören die Erscheinungen der Fluorescenz und Phosphorescenz, bei denen der leuchtende Körper sich nicht merklich erwärmt, ebenso die Lichtentwickelungen bei langsamen Oxydationsprocessen.

f) Verwendung der Emissionsspectra zur Analyse.

Einleitung. Verschiedene Körper geben verschiedene Spectra. Dass dies der Fall ist, lässt sich schon daraus schliessen, dass viele Substanzen, in die Flamme gebracht, dieselbe färben: Lithium roth, Natrium gelb, Kupfer grün etc. Lässt sich schon die Flammenfärbung als solche zur Erkennung gewisser Stoffe verwenden, so ist dies in noch weit höherem Grade mit den Spectren der Fall. Schon die ersten Erforscher dieses Gebietes, Bunsen und Kirchhoff, haben mittelst der Spectra Körper analysirt, und aus dem Auftreten von Linien im Spectrum auf das Vorhandensein bestimmter Elemente geschlossen.

Besonders geeignet ist die Spectralanalyse zur Auffindung der Metalle der Alkali- und Erdalkaligruppe, sowie einiger weniger anderer; die meisten Metalle geben so viele Linien, dass sie schwierig zu identificiren sind. Mit dem Spectralapparat lassen sich noch erkennen von

Na $0{,}0_63$ mgr[1])	Cs $0{,}0_45$ mgr	Rb $0{,}0_33$ mgr
Li $0{,}0_69$ „	Sr $0{,}0_46$ „	K $0{,}0_21$ „
Ca $0{,}0_41$ „	Tl $0{,}0_42$ „	Ba $0{,}0_21$ „

Treten in einem Spectrum eines Körpers Linien auf, die noch bei keinem bekannten Elemente aufgefunden worden sind, so liegt die Vermuthung nahe, dass in dem Körper ein neues Element enthalten ist. Der Gang der Gewinnung des betreffenden Elementes lässt sich durch die Spectralanalyse controliren; man fällt etwa aus der Lösung des zu behandelnden Körpers durch ein Reagens einen Niederschlag. Das Spectroskop lässt, wenn man die eingedampfte Lösung und den Niederschlag auf ihr Emissionsspectrum untersucht, erkennen, in welchem von beiden der neue Körper vollständig oder doch überwiegend enthalten ist.

Auf diese Weise sind entdeckt worden: Cäsium und Rubidium von Bunsen und Kirchhoff, Thallium von Crookes und Lamy, Indium von Reich und Richter, Gallium von Lecoq de Boisbaudran.

Uebung 1. Der Praktikant erhält ein Gemisch von ihm unbekannter Zusammensetzung der Chloride solcher Metalle, welche im Bunsenbrenner ein charakteristisches Spectrum liefern (vergl. S. 287) Er ermittelt aus den auftretenden Linien durch Vergleichung mit den

---

[1]) Wir setzen $0{,}0_63 = 0{,}0000003$.

von ihm gemachten Aufzeichnungen der Metalllinien, welche Metalle das Gemisch enthält.

Uebung 2. Verwendung des Vergleichsprismas. Um zu constatiren, ob eine Linie einem bekannten Element zukommt oder nicht, verwendet man das Vergleichsprisma.

1) Man stellt vor die Fläche *a* des Vergleichsprismas (S. 282) und direct vor den Spalt je eine Lampe, etwa zwei Gaslampen. Man sieht zwei Spectren, die durch einen dunklen Strich getrennt sind. Man hält abwechselnd ein Blatt Papier vor die obere Spalthälfte und vor die Fläche *a* und sieht, dass der oberen Hälfte das untere Spectrum und umgekehrt entspricht.

2) Man stellt vor beide Spalthälften Bunsenbrenner mit Chlornatrium: die gelben Linien liegen genau in der gegenseitigen Verlängerung.

3) Prüfung, ob in einer rothen Flamme neben Strontium noch Lithium vorhanden ist oder nicht. Man bringt die zu untersuchende Substanz in die Flamme vor den Spalt, während vor dem Vergleichsprima eine Flamme mit Chlorlithium steht.

Liegt eine der rothen Linien in der Fortsetzung der rothen Lithiumlinie, so ist Lithium vorhanden, sonst nicht.

7. Absorptionsspectra.

Einleitung. Wie die Emissionsspectra für die einzelnen Körper charakteristisch sind, so auch ihre Absorptionsspectra. Die Molecüle eines Körpers vermögen nur Schwingungen zu absorbiren, die mit denen in naher Beziehung stehen, welche sie selbst oder die in ihnen enthaltenen Atomcomplexe ausführen. Die Beobachtung der Absorptionsspectra liefert daher bei allen Körpern, die nicht so weit erhitzt werden können, dass sie Emissionsspectra liefern, eine wichtige Ergänzung der letzteren.

Für die praktische Verwendung der Farbstoffe sind Untersuchungen von Bedeutung, welche ersehen lassen, in welcher Weise sich die Absorption ändert, wenn man in einer gegebenen färbenden Verbindung ein Element, etwa den Wasserstoff, durch andere Elemente oder Atomgruppen ersetzt.

a) Untersuchung und Aufzeichnung der wichtigsten Absorptionsspectra.

Gebraucht wird: Gefärbte Streifen von Filtrirpapier; Spectroskop mit gerader Durchsicht; Gestelle mit Absorptionsröhren, welche die unten erwähnten Präparate enthalten; farbige Gläser; Uran- und Didymglas; Gaslampe mit Rundbrenner; Spectralapparat nach Bunsen und Kirchhoff,

mit einem Träger für die Absorptionsröhren, Wassertrog und Pappschirm; Reissbrett und Curventafel.

Bei der Untersuchung der Absorptionsspectra wird das Licht untersucht, welches Schichten des betreffenden Körpers durchsetzt hat.

I. Die dabei verwandten Methoden sind im Wesentlichen zwei:

1. Man stellt in den Weg der von einer weissen Lichtquelle kommenden und auf den Spalt eines Spectralapparates fallenden Lichtstrahlen Schichten der absorbirenden Substanz. — Ist sie fest, so verwendet man Platten derselben, ist sie flüssig oder gasförmig, so bringt man sie in planparallele Glaströge oder in Glasröhren (wir haben die Glasröhren mit den Substanzen zugeschmolzen).

Nach dieser Methode werden die unter Uebung angegebenen Versuche, falls nichts Besonderes bemerkt ist, durchgeführt.

2. Man untersucht das diffus von gefärbten Pulvern reflectirte Licht. Dieses enthält einmal an der äussersten Oberfläche der einzelnen Körnchen diffus reflectirtes weisses Licht, ferner aber Licht, das in die Körnchen eingedrungen und an ihrer Rückwand zurückgeworfen ist, und das dann nach zweimaligem Durchlaufen derselben wieder in die Luft austritt. Derselbe Vorgang kann sich auch mehrfach wiederholen. In den Körnchen werden die von ihnen absorbirbaren Strahlen zurückgehalten, die anderen treten wieder aus und bedingen die Körperfarben. Färben wir mit Farbstoffen Zeug oder Papier, so rührt deren Farbe von dem Licht her, das an der Grenze zwischen dem Träger des Farbstoffes und dem letzteren reflectirt nach zwei- oder mehrmaligem Durchlaufen desselben in das Auge gelangt, also nicht absorbirt worden ist.

Uebung. 1) Man stellt Tröge oder Röhren mit den unter „Beispiele“ aufgeführten Substanzen vor den Spalt, letztere so, dass die in Folge ihrer cylindrischen Gestalt entstehende Brennlinie auf denselben fällt.

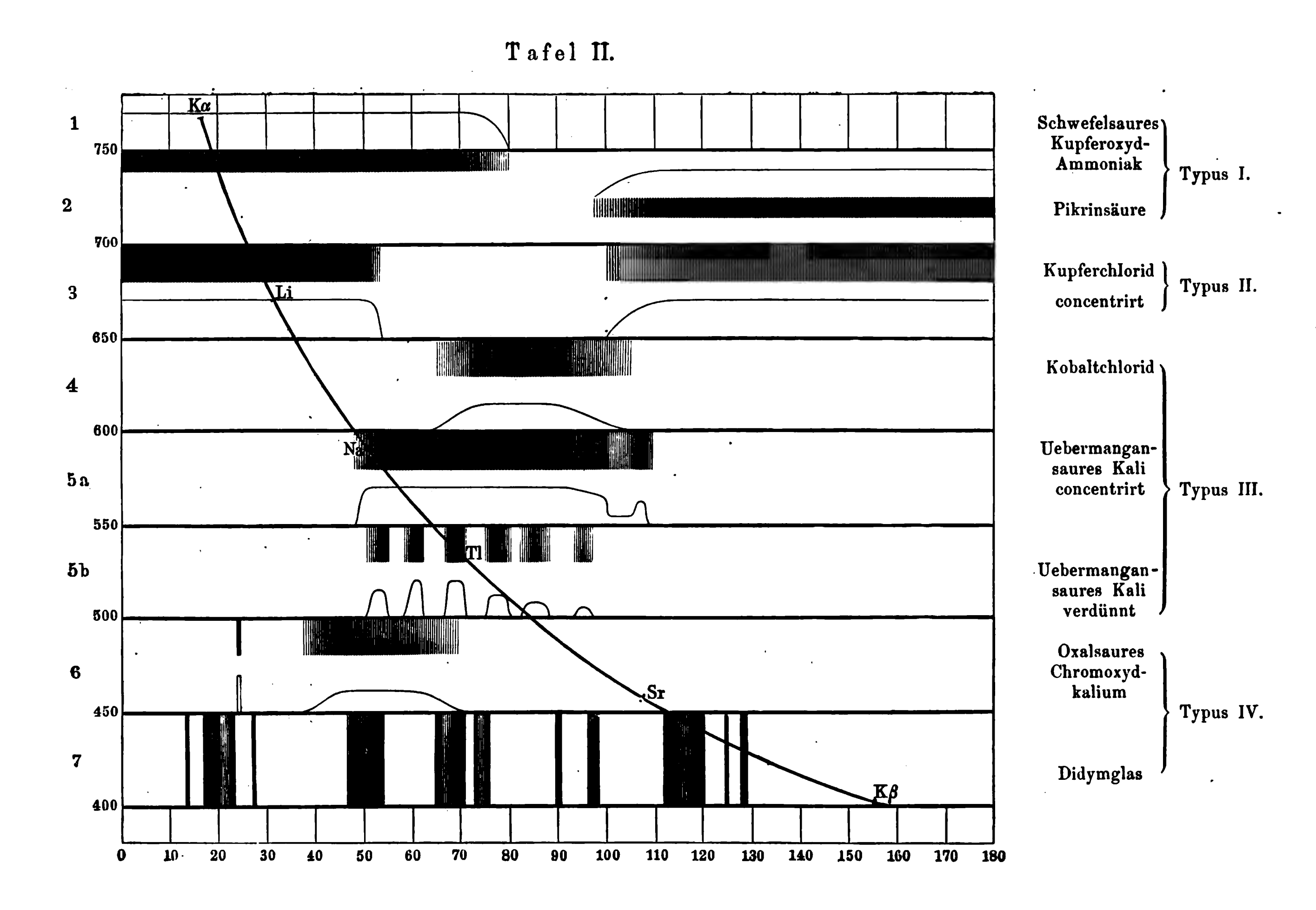
2) Man bestimmt für die unten angeführten Substanzen mit der Scala die Lagen der dunklen Stellen, der Absorptionsstreifen.

3) Man zeichnet dieselben in die Curventafel in ähnlicher Weise ein, wie die Emissionsspectra, und giebt die Helligkeitsvertheilung in jedem einzelnen Streifen wieder: 1. durch Schattirung, oder 2. durch Curven, deren höchste Stelle der stärksten Absorption entspricht, so sind die Curven auf Tafel II, S. 297 gezeichnet; die Curve K_α, $Li \dots K_\beta$ ist die S. 284 und 287 erwähnte.

II. Beschreibung einiger Absorptionsspectra. Die Absorptionsspectra kann man in vier Typen eintheilen.

1. Typus: Einseitige Absorption. Eine Hälfte des Spectrums, gewöhnlich die blaue, wird vollständig absorbirt. Die Grenze der Absorption rückt mit steigender Concentration stetig vor.

Beispiele: Eisenchlorid; Kaliumbichromat; Pikrinsäure (Tafel II, Nr. 2) (sie lassen Roth, Gelb und etwas Grün durch und absorbiren das blaue Ende);



Tafel II.
Schwefelsaures Kupferoxyd-Ammoniak
Pikrinsäure
Typus I.
Kupferchlorid concentrirt
Typus II.
Kobaltchlorid
Uebermangansaures Kali concentrirt
Uebermangansaures Kali verdünnt
Typus III.
Oxalsaures Chromoxydkalium
Didymglas
Typus IV.
1
2
3
4
5a
5b
6
7
750
700
650
600
550
500
450
400
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
150
160
170
180
Kα
Li
Na
Tl
Sr
Kβ

Kupfersulfat; schwefelsaures Kupferoxyd-Ammoniak, hergestellt durch Zusatz von NH_3 zu einer Kupfersulfatlösung, bis der Niederschlag gelöst ist (Taf. II, Nr. 1) (lässt Blau durch, absorbirt Roth, Gelb und Grün ganz oder zum Theil).

2. Typus: Zweiseitige Absorption. Die beiden Enden des Spectrums werden absorbirt, die mittleren Theile werden durchgelassen.

Beispiele: Kupferchlorid [concentrirtere, wässerige Lösungen absorbiren alle Strahlen bis zum Grün und auf der anderen Seite vom Grünblau an; die Lösung erscheint grün (vergl. auch S. 299)]; Nickelchlorid; Kupferacetat.

3. Typus: Bandenspectra. Bei diesen treten innerhalb des sichtbaren Spectrums mehr oder weniger breite, an den Rändern verwaschene Banden oder dunkle Felder („Schatten") auf. Nicht selten gesellt sich dazu eine einseitige oder zweiseitige Absorption der Enden des Spectrums. Die oben als einseitige und zweiseitige Absorption beschriebene Erscheinung ist in vielen Fällen ein Bandenspectrum, bei dem der eine Rand einer Bande im ultravioletten oder infrarothen Spectrum liegt und nur der andere im sichtbaren Spectrum.

Beispiel: Verdünnter Rothwein; Kobaltchlorid (Tafel II, Nr. 4); rothe und blaue Gläser. Hierher gehören auch die beim Joddampf zu beobachtenden Erscheinungen (s. unter 4).

4. Typus: Linienspectra. Das Spectrum ist durchzogen von einzelnen dunklen Absorptionslinien. Linienabsorptionsspectra zeigen besonders die Gase und Dämpfe.

Beispiel: Kaliumchromoxalat. Man stellt in einem Reagirglase eine nicht zu verdünnte Lösung desselben kalt her und hält sie vor den Spalt: Das Spectrum zeigt im Gelb eine verwaschene breite Bande (Typus 3), im Roth eine dunkle scharfe Linie (Typus 4) (Tafel II, Nr. 6). Das Spectrum stellt also einen Uebergang vom 3. zum 4. Typus dar.

Man erwärmt ein etwas Jod enthaltendes, zugeschmolzenes Reagirglas und sieht im Grün drei dunklere Absorptionsbanden, die bei viel Dampf zu einem tiefen Schatten zusammenfliessen; beim allmählichen Erkalten erkennt man in den Banden, sowie im ganzen Gelb bis tief ins Roth hinein bei engem Spalt eine grosse Zahl feiner, scharfer, von einander nahe gleich weit abstehender Linien.

Untersalpetersäure (NO_2), welche in eine Röhre eingeschmolzen ist, zeigt dunkle Linien vor Allem im Grün und Blau; beim Erhitzen mit einem Bunsenbrenner werden dieselben dunkler und zahlreicher. Es beruht dies auf einer Dissociationserscheinung; bei sehr niedrigen Temperaturen hat der Körper die Zusammensetzung $(NO_2)_2$. $(NO_2)_2$ ist ungefärbt; beim Erwärmen zerfällt 1 Mol. $(NO_2)_2$ in je 2 Mol. NO_2, die gefärbt sind. Je höher die Temperatur, um so mehr Molecüle $(NO_2)_2$ sind in Molecüle NO_2 zerfallen, um so dunkler ist die Farbe. Natürlich erreicht die Dunkelheit der Streifen eine Grenze, sobald alle Molecüle $(NO_2)_2$ in NO_2 zerfallen sind.

Zu dieser Classe von Spectren gehört auch das Sonnenspectrum. Auch einige Salze zeigen ein Linienabsorptionsspectrum.

Beispiel: Didym in Didymglas. Die Linien sind einander immer paarweise zugeordnet. — Da das Helligkeitsverhältniss der Linien bei Didymverbindungen je nach den Fundorten ein wechselndes ist, so muss das Didym verschiedene Substanzen enthalten. Man hat in der That aus demselben eine Reihe neuer Elemente (Neodidym, Praseodidym etc.) gewonnen, nach analogen Principien, wie sie bei der Emissionsspectralanalyse (S. 294) be-

sprochen wurden, nur dass hier die Absorptionsspectra die nöthigen Anhaltspunkte für die zur Reindarstellung der einzelnen Bestandtheile dienenden Processe geben.

b) Einfluss von Temperatur, Schichtdicke u. s. w. auf die Absorptionsspectra.

Gebraucht wird: Keilförmiges Hohlprisma; Blätter von Mentha (Pfefferminzthee); Alkohol und Aether. Jodblei und Chromgelb, Quecksilberjodid und Kupferjodid-Quecksilberjodid. Wässerige und alkoholische Safraninlösung; wässerige Kupferchloridlösung (verdünnt und concentrirt); Jod in Alkohol und in Schwefelkohlenstoff gelöst; Kobaltchloridlösung mit und ohne Zusatz von Kochsalz; Reagensgläser.

Die unter „Beispiele" beschriebenen Versuche sind als Uebung auszuführen.

I. Einfluss der Schichtdicke. Je dicker die absorbirende Schicht ist, um so dunkler und breiter sind die Absorptionsstreifen. Bei sehr dicken Schichten können mehrere Absorptionsstreifen zu einem einzigen zusammenfliessen. Dem entsprechend ändert sich in manchen Fällen die Farbe der Lösung.

Beispiel: 1) Man extrahirt durch Uebergiessen von Blättern von Mentha (Pfefferminzthee) mit Alkohol oder Aether den grünen Pflanzenfarbstoff, das Chlorophyll.

2) Man füllt mit dem Aufguss eine keilförmige Glasflasche, welche man vor dem Spalt vorüberführt, und verfolgt die Aenderung des Absorptionsspectrums, wenn man von dünneren Schichten allmählich zu immer dickeren übergeht. Bei dünnen Schichten und nicht zu starken Concentrationen zeigt der alkoholische Aufguss nahe bei einander fünf getrennte Absorptionsstreifen im Gelb, Grün und Grünblau.

II. Einfluss der Concentration. Bei zunehmender Concentration verbreitern sich die Absorptionsbanden gerade wie bei zunehmender Schichtdicke und werden dunkler. Dabei können unter Umständen mehrere derselben zu einer einzigen dunklen Bande verschmelzen, so dass dadurch der Charakter des Spectrums verändert erscheint. [Vorausgesetzt ist, dass bei Concentrationsänderungen nicht auch chemische Veränderungen eintreten (vergleiche das zweite Beispiel).]

Beispiel: Kaliumpermanganat (vergl. Taf. II, Nr. 5 a und 5 b) zeigt in concentrirten Lösungen einen dunkeln, vom Gelb bis in das Blau gehenden Schatten; in verdünnten Lösungen löst sich derselbe in eine Reihe sehr nahe gleich weit von einander abstehende Banden im Grün auf.

Eine verdünnte wässerige Lösung von Kupferchlorid zeigt eine blaue Färbung; im Absorptionsspectrum fehlen die äussersten rothen und violetten Theile. Concentrirte Lösungen zeigen eine intensiv grüne Farbe, das durchgelassene Licht besteht nur noch aus Grün und etwas Blau. Hier gesellt sich zu dem Einflusse der Concentration der Einfluss einer Bildung von wasserhaltigen $CuCl_2$-Molecülen bei wachsender Verdünnung oder einer Ionisation.

Bemerkung. In Folge der Verbreiterung der Absorptionsstreifen kann die Farbe verdünnter Lösungen eine ganz andere sein als diejenige concentrirter, z. B. bei vielen Anilinfarben, beim Chloro-

phyll, das in hinlänglich dicken Schichten in verdünnten Lösungen grün, in sehr concentrirten dagegen roth erscheint; man bezeichnet diese Erscheinung oft unpassend als Dichroismus, ein Ausdruck, der nur auf gewisse Erscheinungen bei Krystallen (vgl. bei Polarisation) angewandt werden sollte.

III. Einfluss des Lösungsmittels. Je nach dem Lösungsmittel ändern sich die Absorptionsspectra für einen Körper. Der Einfluss des Lösungsmittels kann 1) ein rein physikalischer sein; die Absorptionsstreifen sind in Lösungen der meisten Substanzen um so weiter nach dem Roth verschoben, je stärker das Lösungsmittel dispergirt, d. h. je grösser die Constante B in der Cauchy'schen Formel (S. 235) ist (Kundt'sche Regel); 2) ein chemischer sein; durch den Einfluss des Lösungsmittels bedingte Aenderungen im molecularen Bau des absorbirenden Körpers verändern das Spectrum wesentlich.

1. Beispiel für physikalische Veränderung. Von einem concentrirten alkoholischen Chlorophyllauszug werden mit der Pipette gleiche Mengen zu gleichen Mengen von Aether, Alkohol, Chloroform, Benzol und Schwefelkohlenstoff gesetzt; der dem Roth zunächst liegende Absorptionsstreifen erscheint bei jedem folgenden Lösungsmittel weiter nach dem Roth zu verschoben; die obigen Lösungsmittel sind so geordnet, dass jedes folgende eine grössere Dispersion besitzt, als das vorhergehende.

2. Beispiel für chemische Veränderungen. Safranin in Wasser zeigt einen sehr breiten, verwaschenen, matten Absorptionsstreifen, der fast das ganze Grün erfüllt; Safranin in Alkohol zeigt zwei verhältnissmässig dunkle und schmale Streifen im Gelbgrün.

Jod in Alkohol gelöst zeigt eine braune Färbung. Die Lösung lässt nur Roth und Gelb durch, aber kein Blau und Violett, selbst nicht in grossen Verdünnungen. Eine Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff zeigt die violette Färbung des Joddampfes. Blau und Violett werden durchgelassen und nur das Grün wird absorbirt. Hier treten wohl lockere Bindungen zwischen dem Lösungsmittel und dem gelösten Körper auf.

IV. Einfluss der Temperatur. Mit zunehmender Temperatur ändern sich die Absorptionsspectra; die Temperatur kann dabei 1) rein physikalisch einwirken, dann nimmt die Absorption zu; 2) chemisch, indem moleculare Umlagerungen oder chemische Umsetzung eintreten.

Beispiel für physikalische Umänderung. 1) Man erhitzt das hellgelbe Jodblei und das gelbe Chromgelb auf einem Platinbleche, sie werden dunkelgelb, fast rothbraun, schon ehe sie schmelzen. Beim Abkühlen tritt die alte Farbe wieder hervor. Für die Annahme einer chemischen Umänderung, welche die Farbenwandlung bedingte, liegt hier kein Grund vor.

Beispiel für chemische Umänderung. 1) Man erhitzt das rothe Jodquecksilber, es wird gelb und behält die Farbe beim Abkühlen, es geht in eine andere Modification über. 2) Man reibt es und lässt es länger liegen: das Roth kommt wieder zum Vorschein. Das rothe Kupferjodid-Quecksilberjodid wird beim Erwärmen schwarz, auch hier bildet sich eine neue Modification.

Das Dunklerwerden des Pulvers rührt daher, dass die in die Körnchen des heissen Pulvers eindringenden und nach der Reflexion an der Rückfläche wieder austretenden Strahlen stark geschwächt, also stärker absorbirt werden,

als bei Anwendung des kalten Pulvers, die verschiedene Farbe daher, dass die Absorptionsspectra selbst sich ändern.

Beispiel für chemische Umsetzungen in der Lösung unter gleichzeitigem Einfluss der Temperatur. 1) Man erwärmt eine wässerige Lösung des Kobaltchlorids, welche einen breiten, verwaschenen Absorptionsstreifen im Grün zeigt, es ist keine Veränderung bemerklich.

2) Man setzt der Lösung des Kobaltchlorides etwas Chlornatrium zu und erwärmt, sie wird bläulich und zeigt neben dem verwaschenen Streifen im Grün ein breites, aus einem helleren und einem weniger brechbaren, sehr dunklen Theil bestehendes Band im Roth und zwei feine, scharfe Linien im Roth. Beim Abkühlen verschwinden diese Linien und Banden und die Lösung nimmt wieder ihre ursprüngliche Färbung an.

3) Man erwärmt eine blaue verdünnte Lösung von Kupferchlorid, sie wird in Folge einer Wasserabspaltung oder eines Rückganges der Ionisation beim Erhitzen grün.

c) Verwendung der Absorptionsspectra zur Analyse.

Gebraucht wird: Spectralapparat. Mit Fuchsin gefärbte Gelatineplatte; Lösung von KCl, von NaCl und von KCl + NaCl; Bunsenbrenner. — Urannitratlösung; granulirtes Zink; Salzsäure; Eisenchloridlösung mit und ohne Zusatz von Urannitrat; Reagensgläser. — Alkannalösung in 2 Thln. Alkohol und 1 Thl. Aether; Ammoniak; Lösung von kohlensaurem Ammoniak in Wasser (1 : 8); Lösung von Chlormagnesium in Wasser (1 : 100); Kalialaunlösungen mit und ohne Zusatz von Magnesiumsulfat. — Frisches Blut; Schwefelammoniumlösung; Salzsäure; Aetzkali (oder kohlensaures Natron); Leinwand mit eingetrockneten Blutflecken; Reagensglas zur Entwickelung von Kohlenoxyd; Oxalsäure; Schwefelsäure; weinsaure Eisenoxydullösung (1 Thl. Eisenvitriol, 1 Thl. Weinsäure, 10 Thle. Wasser).

I. Nachweis von Kalium neben Natrium.

Princip. Eine dünne, mit Fuchsin gefärbte Gelatineplatte oder eine Platte aus Kobaltglas lässt nur das Roth und äusserste Blau durch, absorbirt aber das Gelb; man benutzt sie zum Nachweis von Kalium neben Natrium in der Flamme.

Uebung. 1) An einer Platindrahtöse wird ein Tropfen einer mässig concentrirten Chlornatriumlösung in die Flamme des Bunsenbrenners gebracht, und die Flamme durch eine mit Fuchsin gefärbte, dünne Gelatineplatte oder eine Kobaltglasplatte betrachtet: die Flammenfärbung ist fast unmerklich.

2) Die Flamme wird durch eine Chlorkaliumperle gefärbt und durch die Platte betrachtet; die Flamme erscheint hellviolett: die Platte lässt die rothen und violetten Strahlen des Kaliums durch, die gelben des Natriums dagegen nicht.

3) Von zwei Lösungen enthält die eine nur Chlornatrium, die andere auch Chlorkalium. Mit Hülfe der Flammenfärbung ist zu ermitteln, in welcher Lösung sich das Kalium befindet.

II. Spectralreactionen der Uransalze.

Erkennung des Urans. Uraninitrat ($UO_2N_2O_6 + 6H_2O$) zeigt in wässerigen, concentrirten Lösungen eine gleichförmige Ab-

sorption im Indigo und Violett; in der Nähe der *F* ($H\beta$)-Linie eine schwache, schmale Absorptionsbande, weiter nach dem Violett eine breitere und dunklere; ähnliche Erscheinungen zeigen andere Uranisalze.

Charakteristischer ist das Absorptionsspectrum der Uranosalze.

Uebung 1. 1) In eine in einem Reagensglase enthaltene concentrirte Uraninitratlösung wirft man einige Stückchen granulirten Zinks und giesst reichlich Salzsäure dazu. Unter lebhafter Wasserstoffentwickelung färbt sich die Lösung allmählich schmutzig dunkelgrün, das Urani- wird zu dem Uranosalz reducirt.

2) Man giesst etwas von dieser Lösung in ein etwa 12 mm weites Reagirglas und stellt sie vor den Spectralapparat. Man erhält das Absorptionsspectrum der Uranosalze. Dasselbe zeigt eine sehr kräftige, breite Absorptionsbande im Orange, und eine schmälere, aber ebenfalls sehr dunkle Linie nach dem Roth zu. Beide sind in einen schwächeren Schatten gehüllt, in dem nach dem Gelb zu noch ein schwaches, drittes Absorptionsmaximum zu sehen ist. Im Grün erscheint eine breite, verwaschene, schwächere Bande, im Blau mehrere schwache Banden, an letztere schliesst sich eine continuirliche Absorption des Violett. Durch dieses Spectrum, besonders durch die Linien im Orange, kann man Spuren von Uran nachweisen; Gegenwart von Eisen, Chrom, Kobalt, Nickel, Zink oder Aluminium stört die Reaction nicht.

Uebung 2. Von zwei Eisenchloridlösungen, von denen der einen Uraninitrat zugesetzt ist, werden Proben in zwei gleich weite Reagirgläser gegossen, beide werden durch Zink und (reichlichen) Salzsäurezusatz reducirt. Das Auftreten des Absorptionsspectrums der Uranosalze zeigt, welche von den beiden Lösungen Uran enthält.

III. Spectralreaction zur Erkennung von Magnesium.

Uebung 1. 1) Man übergiesst Alkannawurzel mit Alkohol. Der Auszug ist roth, das Spectrum zeigt drei breite verwaschene, matte Streifen im Grüngelb, Grün und Blaugrün.

2) Man übergiesst im Reagirglase ein Stückchen Akannawurzel mit Alkohol, setzt einen Tropfen der Lösung von kohlensaurem Ammoniak zu und bestimmt die Lage der Streifen (bei der rein alkoholischen Lösung tritt ein dunkler Streifen im Orange auf).

3) Man übergiesst die Alkannawurzel mit einem Gemisch von 2 Thln. Alkohol und 1 Thl. Aether. Man setzt Ammoniak zu, die Lösung wird blau und zeigt zwei verwaschene Streifen im Orange und Gelb.

4) Man setzt zu einer alkoholisch-ätherischen Alkannalösung einen Tropfen (nicht mehr!) einer Lösung von kohlensaurem Ammoniak in Wasser (1 : 8). Das Spectrum ändert sich nicht; die so erhaltene Lösung dient als Probeflüssigkeit.

5) Man setzt zu der Probeflüssigkeit einen Tropfen einer Chlormagnesiumlösung (1 : 100); die Flüssigkeit wird himmelblau und zeigt ein Spectrum mit zwei Streifen im Orange und Gelbgrün (zu beiden Seiten von *D*), die weiter nach dem Roth liegen, als die Streifen der alkoholisch-ammoniakalischen Lösung. An dem Auftreten dieser beiden Streifen erkennt man Magnesia leicht neben Kalk und Thonerde.

Uebung 2. Der Praktikant erhält zwei Kalialaunlösungen, von denen die eine Spuren von Magnesiumsulfat enthält. Zu ermitteln ist, welche Lösung Magnesium enthält. Man lässt beide Lösungen auf die Probeflüssigkeit einwirken. Das Auftreten der beschriebenen Streifen lässt das Magnesiumsalz erkennen.

IV. Die Blutreactionen.

Uebung. 1) Man verdünnt frisches Blut mit 40 Thln. Wasser; die Lösung zeigt die zwei sehr intensiven Absorptionsstreifen des Oxyhämoglobins im Gelb und Grüngelb (Fig. 183, Nr. 1). Der eine Streifen beginnt fast genau an der Natriumlinie (*D*). Im Blau hinter *F* beginnt die totale Absorption.

2) Man verdünnt die wässerige Blutlösung mehr und mehr: die Streifen werden schmäler, behalten aber ihre mittleren Lagen bei. Man bestimmt die Lage der Mitten der beiden Streifen an der Scala.

3) Zu einer verdünnten Blutlösung setzt man etwas Schwefelammonium und lässt sie eine Zeit lang stehen: die Oxyhämoglobinstreifen verschwinden; ein sehr blasser, breiter, verwaschener Streifen im Grün tritt auf (Fig. 183, Nr. 2). Der Blutfarbstoff wird reducirt, das Band im Grün kommt dem reducirten Hämoglobin zu. Alkalische Reductionsmittel reduciren also das Oxyhämaglobin vollständig.

4) Man schüttelt die Lösung, der Blutfarbstoff oxydirt sich wieder, die beiden Streifen des Oxyhämaglobins treten wieder auf.

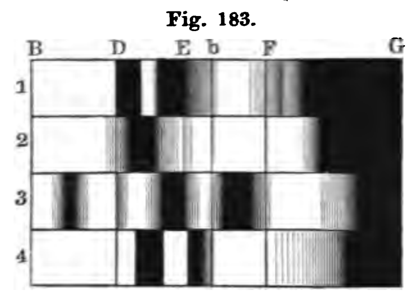
5) Man stellt eine concentrirte Blutlösung her und tropft einige Tropfen Salzsäure zu: die Lösung wird braun, die Hämoglobinstreifen verschwinden. Es tritt ein dunkler Streifen im Roth und zwei sehr breite und verwaschene Streifen im Grün auf (Fig. 183, Nr. 3). Das im Roth auftretende Band nennt man das Säureband. Saure Reductionsmittel zerstören also das Oxyhämoglobin.

6) Man erwärmt eine verdünnte Blutlösung mit einer concentrirten Lösung von Aetzkali oder Natriumcarbonat. Die Lösung wird grün: es entsteht Oxyhämatinalkali. Beim Erkalten wird die Lösung röthlich. Das Spectrum zeigt einen leichten Schatten im Gelb, daneben aber manchmal noch einen intensiv schwarzen Streifen im Gelbgrün.

7) Man schüttelt die Lösung kräftig mit Luft: es tritt wieder eine Oxydation ein: der dunkle Streifen verschwindet, es bleibt nur der matte Schatten. Häufig kommt der Streifen gar nicht zum Vorschein.

8) Man setzt zu der soeben erhaltenen Lösung einige Tropfen Schwefelammonium: sogleich erscheinen zwei sehr dunkle Streifen im Grün (vgl. Fig. 183, Nr. 4), die grosse Aehnlichkeit haben mit den Oxyhämoglobinstreifen. Der nach dem Roth hin gelegene Streifen ist aber ungleich intensiver als der andere, viel mehr als dies bei den Oxyhämoglobinstreifen der Fall ist. Beide Streifen liegen ferner dem Blau näher. Sie gehören dem reducirten Hämatin an.

Fig. 183.



9) Untersuchung eingetrockneter Blutflecken. Von einem mit eingetrocknetem Blut befleckten Stück Leinwand schneidet man einige Streifen ab und erhitzt sie mit Na_2CO_3-Lösung (1:10) einige Zeit. Man giesst etwas von der entstandenen braunen Lösung in ein Reagensglas und tropft etwas $(NH_4)_2S$ zu. Sofort erscheinen die für das reducirte Hämatin charakteristischen Streifen (Fig. 183, Nr. 4).

10) Nachweis einer Blutvergiftung durch Kohlenoxyd. Eine Lösung von weinsaurem Eisenoxydul (1 Thl. Eisenvitriol, 1 Thl. Weinsäure und 10 Thle. Wasser) wird mit 0,6 ihres Volumens Ammoniak versetzt.

11) Man tropft von dieser Lösung einige Tropfen in eine sehr verdünnte Lösung von reinem, frischem Blut: die Oxyhämoglobinstreifen verschwinden und an ihre Stelle tritt ein sehr verwaschener Streifen im Grün.

12) Man giesst von der ursprünglichen Blutlösung etwas in ein Reagirglas und leitet einige Minuten lang einen Strom von Kohlenoxyd hindurch. Man stellt dies dar, indem man in einem Reagirglase über krystallisirte Oxalsäure concentrirte Schwefelsäure giesst und gelinde erwärmt. (Die bei dem Zerfall der Oxalsäure neben dem Kohlenoxyd auftretende Kohlensäure braucht man nicht zu entfernen.)

Die Blutlösung nimmt eine etwas mehr rosafarbene Farbe an.

13) Man giesst zu dieser kohlenoxydhaltigen Blutlösung etwas von der alkalischen weinsauren Eisenlösung: die Oxyhämoglobinstreifen verschwinden nicht; dadurch ist sie von der reinen Blutlösung unterschieden.

8. Untersuchung des Sonnenspectrums.

Gebraucht wird: Heliostat; Spectralapparat; Papptafel; Curventafel; Vergleichsprisma; Natriumflamme.

Uebung. 1) Man leitet das von der Sonne oder dem hellen Himmel kommende Licht durch einen Heliostaten auf den Spalt des Spectralapparates.

2) Man macht den Spalt eng: man sieht in dem Farbenbande eine Reihe von dunklen Absorptionslinien, „Fraunhofer'sche Linien“, die in dem sichtbaren Theile des Spectrums mit dem Buchstaben A bis H und a etc. bezeichnet werden (Fig. 184).

Fig. 184.



3) Man bestimmt die Lage derselben auf der Scala in folgender Weise:

Man beleuchtet die Scala, stellt das Fadenkreuz auf die betreffende Linie im Sonnenspectrum, blendet durch ein vor den Spalt gehaltenes Stück Pappe die Sonnenstrahlen ab, liest die Lage des Fadenkreuzes auf der Scala ab und trägt die Punkte in die Curventafel ein.

Man sieht, dass auf dieselbe Stelle fallen: Linie D und die gelbe Natriumlinie; ferner b und die S. 291 beschriebenen Magnesiumlinien im Grün, sowie die Fraunhofer'schen Linien C, F und h und die Wasserstofflinien $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$.

3) Die Coincidenz der D-Linie und der Natriumlinie ist noch mit dem Vergleichsprisma zu constatiren.

4) Man stellt eine Natriumflamme vor den Spalt, während auf ihn die Sonnenstrahlen treffen. Die D-Linie erscheint viel dunkler als zuvor.

5) Man stellt eine Lithiumflamme vor den Spalt; an der Stelle, wo die helle rothe Lithiumlinie liegt, erscheint eine dunkle Linie.

Aus solchen Beobachtungen wie 4) und 5) und entsprechenden theoretischen Betrachtungen hat Kirchhoff den Satz abgeleitet:

„Ein Körper sendet gerade die Strahlen aus, die er absorbirt“.

Die Fraunhofer'schen Linien entsprechen zum Theil Absorptionslinien von Elementen, die in der Sonnenatmosphäre vorhanden sind, ein anderer Theil (so A und B) rührt von der Absorption in der Erdatmosphäre her. Aus dem Auftreten der ersteren schliesst man, dass die Sonne und die Erde dieselben Elemente enthalten.

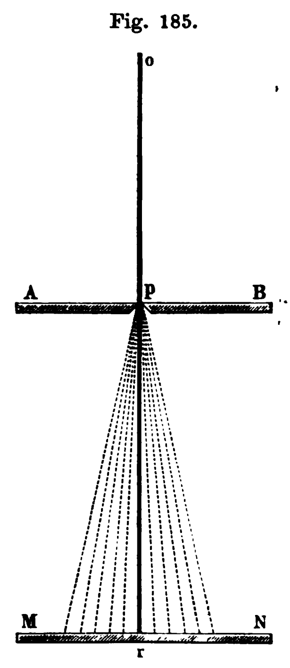
VII. Interferenz des Lichtes.

1. Bestimmung der Wellenlänge λ mit dem Gitter.

Gebraucht wird: Spectrometer; kleines Prisma; verstellbarer Spalt; Glasgitter; Gaslampe; Bunsenbrenner: Natrium- und Lithiumchlorid; Mikroskop; getheilte Glasplatte.

Einleitung. Fällt auf einen Spalt eine Lichtwelle, so verhält sich das den Spalt erfüllende Stück der Welle wie eine Lichtquelle, d. h. von jedem Punkte des Spaltes breitet sich nach allen Seiten Licht aus (Huygens'sches Princip, Fig. 185), der einfallende Strahl wird gebeugt. Die Intensität des Lichtes ist um so kleiner, je stärker der gebeugte Strahl gegen den geradlinig fortschreitenden geneigt ist.

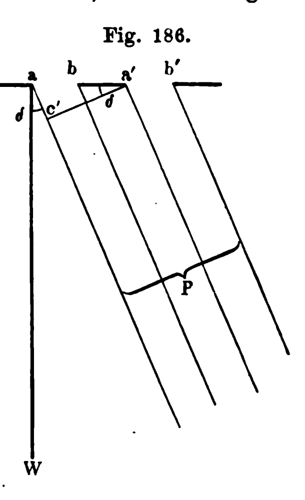
Fig. 185.



Wir vereinen die in einer bestimmten Richtung ausgehenden, unter einander parallelen Strahlen durch eine in ihren Weg gestellte Linse auf einem Schirm zu einem Bilde des Spaltes und untersuchen die Helligkeitsvertheilung. Durch Einschaltung der Linse werden die Gangunterschiede zwischen den einzelnen Strahlen nicht geändert. Der Spalt hat stets eine endliche Breite, von jedem Punkte desselben geht ein divergirendes Strahlenbündel aus; die in einer bestimmten Richtung ausgehenden, unter einander parallelen Strahlen, welche in den verschiedenen Bündeln enthalten sind, haben durch die Beugung verschiedene Gangunterschiede erhalten und geben so zum Auftreten von Minimis und Maximis Veranlassung, gerade wie bei dem specieller zu behandelnden Falle von zwei Spalten. Es seien zwei Spalte ab und $a'b'$ (Fig. 186) gegeben; wir beleuchten dieselben mit homogenem Licht von der Wellenlänge λ. Von einem jeden der Spalte gehen Bündel paralleler Strahlen aus, welche verschieden stark gegen das Loth aW auf der Spaltebene geneigt sind. Wir vereinigen zunächst Strahlen derjenigen zwei Bündel, die so verlaufen, dass der Gangunterschied zwischen den am weitesten links gelegenen Strahlen eines jeden derselben $ac' = \frac{1}{2}\lambda$ ist, dann

heben sich diese beiden Strahlen auf (vergl. S. 128), es tritt Dunkelheit ein, und da der Gangunterschied auch für alle anderen von entsprechenden Stellen, z. B. den Mitten der Spalte, ausgehenden Strahlen derselbe ist, so heben sich die ganzen Strahlenbündel auf; ist der Gangunterschied der beiden zuerst erwähnten Strahlen $= \lambda$, so verstärken sich dieselben und ebenso alle anderen paarweise, es tritt Helligkeit auf. Wächst der Winkel, den die Strahlenbündel mit dem auf der Spaltebene errichteten Loth bilden, so nimmt der Gangunterschied stetig zu, die Gangunterschiede nehmen z. B. die Werthe $^3/_2\,\lambda$, $2\,\lambda$, $^5/_2\,\lambda$ an und es wechseln helle und dunkle Stellen auf dem Schirme ab.

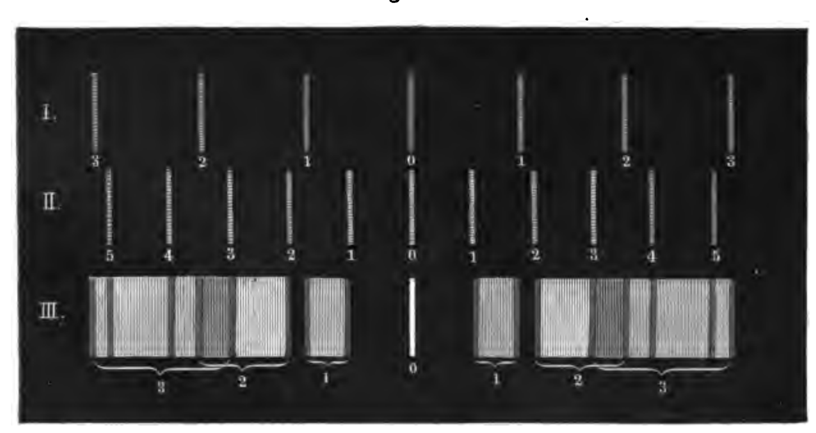
Fig. 186.



Je kleiner der Abstand aa' ist, um so stärker müssen die Strahlen geneigt sein, damit der Gangunterschied ac' eine Wellenlänge λ beträgt. Je kleiner λ ist, um so kleiner ist die Neigung der Strahlen, bei welcher $ac' = \lambda$ wird.

Bei mehr als zwei beugenden Spalten treten ähnliche Verhältnisse wie bei zwei Spalten ein; wir erhalten ebenfalls eine Reihe von hellen und dunklen Stellen.

Fig. 187.



Je grösser die Zahl der Spalte ist, um so lichtstärker ist die Erscheinung. Man nennt eine solche Reihe von Spalten ein Gitter.

Fällt weisses Licht auf das Gitter, so erhalten wir auf einem in den Weg der gebeugten Strahlen gestellten Schirm Spectra, bei denen das Violett (II) (Fig. 187), da es der kleinsten Wellenlänge entspricht,

und daher bei der kleinsten Neigung der Strahlen ein Maximum der Helligkeit liefert, am nächsten dem direct durchgehenden Strahl (0) liegt, das Roth (I) dagegen am weitesten von demselben abliegt. Weiter von dem gerade durchgehenden Strahl abliegende Spectren greifen über einander (III).

Bei einem Gitter heisst die von einer dunklen Stelle und einem Zwischenraum eingenommene Strecke $C = aa'$ die Gitterconstante; diese und nicht etwa die Breite des dunklen oder diejenige des hellen Zwischenraumes für sich ist für die Lage und die Breite der Spectren maassgebend; die Spectren bezeichnet man als das erste, zweite, dritte Gitterspectrum; bei ihnen beträgt der Gangunterschied zwischen entsprechenden Strahlen 1, 2, 3 ... Wellenlängen, man zählt sie von dem direct durchgegangenen Strahl an, dessen Bild als das 0[te] Spectrum bezeichnet wird.

Fig. 188.



Ist δ der Winkel zwischen der Normalen aW (Fig. 186) auf dem Spalt und den parallelen Strahlen P, und ist die Gitterconstante $aa' = C$, so tritt Helligkeit auf, sobald

$$C \sin\delta = ac' = \lambda \text{ oder} = 2\lambda,$$

allgemein, wenn $C \sin\delta_n = n\lambda$, wo δ_n die Ablenkung für den untersuchten Strahl im n^{ten} Spectrum ist.

Statt der $\sin\delta$ kann man für kleine Winkel auch die Winkel δ selbst, gemessen durch die Kreisbögen, setzen, also die in Geraden gemessenen Winkel, dividirt durch 57,296. Man findet dann

$$C\delta_n = n\lambda.$$

Der dem n^{ten} Maximum entsprechende Winkel δ_n verhält sich zu dem dem ersten Maximum entsprechenden δ_1 wie $n:1$

$$\delta_1 : \delta_n = 1 : n\ ^{1)}.$$

Messen wir die Winkel δ'_n und δ''_n, wie sie in irgend einem Spectrum zwei Linien mit den Wellenlängen λ' und λ'' zukommen, so ist

$$C\delta'_n = n\lambda' \text{ und } C\delta''_n = n\lambda''$$

$$\text{oder } \delta'_n : \delta''_n = \lambda' : \lambda''\ ^{1)},$$

[1]) Diese Proportionalität gilt auch, wenn man die Winkel in gewöhnlicher Weise misst.

d. h. es verhalten sich die Ablenkungen wie die Wellenlängen. Das von einem Gitter entworfene Spectrum heisst Normalspectrum, da die Ablenkungen der einzelnen Strahlen proportional den Wellenlängen sind.

Apparat. Derselbe besteht aus einem Spectrometer, dessen Fernrohre senkrecht zur Drehungsaxe gestellt sind (s. S. 247), und auf dessen Tisch man ein Prisma oder ein Gitter aufstellen kann, etwa eine Glasplatte, in die in gleichen Abständen von einander Linien eingeritzt sind; diese entsprechen den dunklen Stellen des Gitters.

Uebung. 1. Beobachtung. 1) Man stellt zunächst das Prisma auf und überzeugt sich, dass in dem von diesem erzeugten Spectrum das Roth am wenigsten, das Violett am stärksten abgelenkt ist, und dass das Roth sehr schmal, das Violett sehr breit ist.

2) Man stellt einen Spalt auf das Tischchen. Man sieht, wie nach S. 306 zu erwarten, nicht eine feine Lichtlinie, sondern einen breiten Streifen, dessen Breite um so grösser wird, je enger man den Spalt macht. Das Bild besteht aus mehreren hellen und dunklen Streifen, die durch Interferenz entstehen. Sie rücken mit zunehmender Breite des Spaltes immer näher zusammen.

3) Man stellt das Glasgitter *M* statt des Prismas auf und richtet das Fernrohr direct auf den Spalt *d*. Dreht man es nach rechts oder links, so sieht man Spectra (Fig. 187), deren rothe Enden am stärksten, deren violette am wenigsten abgelenkt sind, das Gelb liegt etwa in der Mitte des Spectrums; das Roth ist breit, das Violett schmal.

2. Senkrechtstellen des Gitters. Zu den Messungen muss man das Gitter senkrecht zur Collimatoraxe stellen. (Auf Benutzung des Minimums der Ablenkung bei der Bestimmung der Wellenlängen gehen wir hier nicht ein.) 1) Man setzt in das Beobachtungsfernrohr ein Gauss'sches Ocular ein, resp. verwendet die oben erwähnte Glasplatte (S. 246 oben).

2) Man stellt vor den Spalt eine Gaslampe und stellt das Fadenkreuz direct auf den Spalt ein.

3) Man stellt das Gitter auf das Tischchen und dreht es, bis das direct gesehene Fadenkreuz sich mit seinem Spiegelbilde am Gitter deckt.

3. Messung. a) Man stellt das Fadenkreuz auf den Spalt ein und liest die Stellung des Fernrohres ab; Ablesung: α_0.

Man stellt das Fadenkreuz auf das Roth im ersten, zweiten, dritten Spectrum; Ablesung: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.

Die Ablenkungen sind $\alpha_1 - \alpha_0, \alpha_2 - \alpha_0, \alpha_3 - \alpha_0$. Es ist

$$\alpha_1 - \alpha_0 : \alpha_2 - \alpha_0 : \alpha_3 - \alpha_0 = 1 : 2 : 3.$$

b) Man ersetzt die Gaslampe durch eine Natrium- und Lithiumflamme, welche Strahlen von den Wellenlängen λ_{Na} und λ_{Li} liefern, und macht dieselben Ablesungen wie oben:

$$\text{für } Na\text{: } \beta_1 \ldots \beta_n, \text{ für } Li\text{: } \gamma_1 \ldots \gamma_n.$$

Dann ist z. B.:

$$\beta_1 - \alpha_0 : \beta_2 - \alpha_0 = \gamma_1 - \alpha_0 : \gamma_2 - \alpha_0 = 1 : 2 : \ldots : n.$$

Aus diesen Messungen ergiebt sich das Verhältniss der Wellenlängen λ_{Na} und λ_{Li}:

$$\lambda_{Na} : \lambda_{Li} = \beta_n - \alpha_0 : \gamma_n - \alpha_0.$$

Kennen wir λ_{Na}, so können wir auch λ_{Li} finden.

c) Bestimmung der Wellenlänge λ_{Na}. Es ist

$$C \sin \delta_n = n \lambda_{Na}.$$

In dieser Gleichung kennen wir δ_n und n; um λ_{Na} zu berechnen, müssen wir noch: d) die Gitterconstante C bestimmen.

Man legt auf das Tischchen eines Mikroskops eine in $^1/_m$ mm getheilte Glasplatte mit der Theilung nach oben und auf diese das Glasgitter, mit der getheilten Fläche nach unten, und zählt ab, wie viel Theilstriche x auf dem Gitter dem Zwischenraum zwischen zwei Strichen auf der getheilten Platte entsprechen. Die Gitterconstante ist $C = {^1/_{mx}}$ mm, denn mx Zwischenräume des Gitters kommen auf 1 mm, also ist

$$\lambda_{Na} = \frac{C \sin \delta_n}{n}.$$

Beispiel: Natriumlicht: $n = 1$, $\delta = 4^0\, 15'$; $C = 1/125$ mm; $\lambda_{Na} = 0{,}000593$ statt 0,000590 mm.

2. Newton'sche Farbenringe.

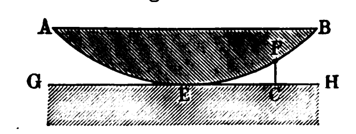
Gebraucht wird: Theilmaschine; Gläser für die Newton'schen Farbenringe; Natrium- und Lithiumflamme; rothes Glas oder mit Fuchsin gefärbte Gelatineplatte; Linse; planparallele Glasplatte; Fernrohr, Stative.

Princip. Fallen parallele Lichtstrahlen auf eine durchsichtige Platte, so wird ein Theil derselben an der Vorderfläche reflectirt, ein anderer Theil dringt in die Platte ein und wird zum Theil an der Hinterfläche zurückgeworfen. An der Vorderfläche treffen also Strahlen zusammen, welche verschieden lange Wege von ihrem Ausgangspunkte in der Lichtquelle zurückgelegt haben, die also mit einem gewissen Gangunterschiede weiter gehen. Solche Strahlen geben zu Interferenzerscheinungen Anlass (vergl. die analogen Erscheinungen bei den Schallwellen, S. 28).

Wir stellen eine dünne Luftplatte dadurch her, dass wir auf die ebene Glasplatte GH (Fig. 189) eine schwach gekrümmte Planconvexlinse AEB legen; der Radius der gekrümmten Fläche sei R. Fallen senkrecht auf die ebene Fläche AB homogene Strahlen von der Wellenlänge λ, so interferiren Strahlen, welche zum Theil an der Glasplatte GH, zum Theil an der Fläche AEB reflectirt worden sind. Die Grösse des Gangunterschiedes zwischen denselben hängt von der

Dicke $FC = d$ der Luftschicht zwischen AEB und GEH ab; da diese in gleichen Entfernungen r von dem Berührungspunkte E bei senkrechter Incidenz immer die gleiche ist, so entstehen concentrische helle und dunkle Ringe (Fig. 190 bei N).

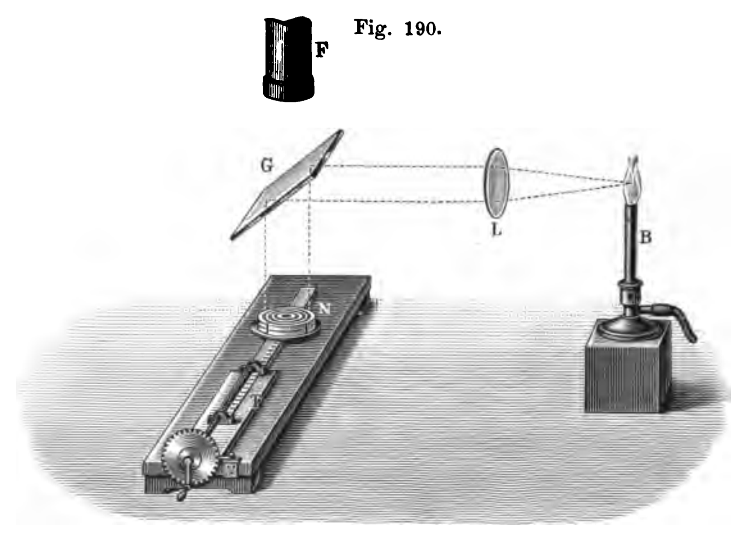
Fig. 189.



Ist der Durchmesser eines beliebigen hellen oder dunklen Ringes gleich D, so ist der des nächst grösseren hellen oder dunklen Ringes gleich D_1, wo $D_1^2 - D^2 = 8\,R\,.\,{}^1/_2\,\lambda$, der des zweitnächsten gleich D_2, wo $D_2^2 - D^2 = 8\,R\,.\,{}^2/_2\,\lambda$ u. s. f. ist. Bestimmt man für Licht mit einer bekannten Wellenlänge z. B. λ_{Na} einige Ringdurchmesser, so kann man hieraus R berechnen. Für jede andere Strahlengattung kann man dann umgekehrt aus dem gemessenen D und dem bekannten R die Wellenlänge λ berechnen [1]).

Apparat (Fig. 190). Auf den Schlitten einer Theilmaschine T werden die zur Erzeugung der Farbenringe dienenden Newton'schen

Fig. 190.



Gläser N gelegt; dieselben werden durch das durch die Linse L parallel gemachte und durch die Glasplatte G senkrecht nach unten geworfene Licht einer Natrium- oder Lithiumflamme erleuchtet. Ueber der Glasplatte G steht das Fernrohr F.

Uebung 1. Messung der Radien der Ringe. 1) Man beleuchtet das Ringsystem N mit gelbem Natriumlicht, stellt das Fernrohr F in die Verticalebene, welche durch die Axe der Linse L und die Flamme geht, bringt das auf der Theilmaschine befestigte System N gleichfalls in diese Ebene und stellt auf die Ringe ein.

---

[1]) Dabei brauchen die Gläser sich nicht zu berühren.

2) Man dreht das Fernrohr so, dass ein Faden des Fadenkreuzes senkrecht zu der Schraube der Theilmaschine steht.

3) Man dreht die Schraube der Theilmaschine und bringt dadurch die einzelnen Ringe der Reihe nach auf den Faden, der senkrecht zur Schraube steht.

4) Man liest für die beiden Seiten eines hellen Ringes, der der Mitte nicht zu nahe liegt, und der nach aussen auf ihn folgenden hellen Ringe die Stellungen an der Theilmaschine a, a', a_1, a'_1, a_2, $a'_2, \ldots$ ab.

Dann ist $D = a - a'$, $D_1 = a_1 - a'_1$, $D_2 = a_2 - a'_2, \ldots$, die Differenzen $D_1^2 - D^2$, $D_2^2 - D^2, \ldots$, verhalten sich wie die auf einander folgenden Zahlen 1, 2, 3.

Uebung 2. Bestimmung des Krümmungsradius R. Aus den Durchmessern des grössten D_g und kleinsten D_k der gemessenen hellen oder dunklen Ringe und der Wellenlänge $\lambda = 0{,}000589$ mm des gelben Natriumlichtes berechnet man R nach der Formel:

$$R = (D_g^2 - D_k^2)/4\,n\,\lambda,$$

wo n die Zahl der zwischen D_k und D_g liegenden hellen oder dunklen Ringe ist[1]).

Uebung 3. Bestimmung der Wellenlänge des Lithiumlichtes. 1) Man färbt die Flamme durch Einbringen von Lithiumchlorid roth. Wenn die Ringe nicht rein roth erscheinen, sondern noch gelbe Säume zeigen, wodurch sie ein verwaschenes Aussehen erhalten, so ist neben dem rothen Lithiumlicht noch zu viel Natriumlicht in der Flamme. Man hält letzteres durch eine in den Gang der Strahlen gebrachte Gelatineplatte ab, welche mit Fuchsin roth gefärbt ist.

2) Man bestimmt die Durchmesser einer Anzahl p auf einander folgender heller Ringe. Dann ist

$$\lambda_{Li} = (D_a^2 - D_i^2)/4\,p\,R,$$

wo D_a und D_i die Durchmesser des äussersten und innersten der gemessenen Ringe sind.

Bemerkung. Da die Ringdurchmesser bei verschieden gefärbtem Lichte verschieden gross sind, so entstehen bei Beleuchtung mit weissem Lichte farbige Ringe, die freilich nur da deutlich zu sehen sind, wo die Luftplatte sehr dünn ist. Diese sowohl im auffallenden wie im durchgehenden weissen Lichte sichtbaren Farben gehören zu den „Interferenzfarben dünner Blättchen".

---

[1]) Hierbei ist vorausgesetzt, dass die Ganghöhe der Theilmaschinenschraube genau 1 mm beträgt, dass also die D durch die Ablesungen von a in Millimetern erhalten werden. Ist dies nicht der Fall, so muss man die Schraube aichen. Dazu legt man an Stelle des Farbenglases eine in Millimeter getheilte Scala auf die Theilmaschine und bestimmt in der unter 1) angegebenen Weise die Ablesungen A und A', welche einer bestimmten Anzahl n von Millimetern entsprechen. Dann ist $(A - A')/n = c$ die Ganghöhe der Schraube und jede der Differenzen $a - a'$, $a_1 - a'_1$ u. s. w. muss mit c multiplicirt werden.

VIII. Polarisation.

Gebraucht wird: Der Nörremberg'sche Apparat (Fig. 191) mit analysirendem Spiegel, Glasplattensatz und drehbarem Nicol; Glasplatte; Kalkspathkrystall (Spaltungsstück in Fassung); Fadenmodell des Kalkspathrhomboëders; Nicol'sche Prismen und Modell derselben; Turmalinzange; senkrecht zur Axe geschnittene Kalkspath- und Quarzplatten; $^1/_4$ Undulationsglimmerplatte.

Oben wurde erwähnt, dass das Licht in transversalen Schwingungen besteht; bei dem gewöhnlichen, natürlichen Licht erfolgen die Schwingungen in allen Ebenen, die durch den Lichtstrahl gelegt sind. Jede dieser Schwingungen lässt sich theoretisch in zwei zerlegen, von welchen die eine in einer bestimmten Ebene, die andere in einer dazu senkrechten Ebene stattfindet.

Durch besondere Vorrichtungen können wir einen natürlichen Strahl vollkommen in zwei zerlegen, die so beschaffen sind, dass bei jedem oder doch bei einem derselben die Schwingungen sämmtlich nur in einer einzigen Ebene stattfinden; ein solcher Lichtstrahl heisst geradlinig polarisirt. Dies geschieht mehr oder weniger vollkommen bei der Reflexion und Brechung von Lichtstrahlen an ebenen Flächen.

Von Vorrichtungen zur Erzeugung von polarisirten Strahlen besprechen wir den Nörremberg'schen Polarisationsapparat, das Nicol'sche Prisma (auch kurz Nicol genannt) und die Turmalinplatte.

1. Polarisation durch Reflexion und Brechung an ebenen Glasflächen.

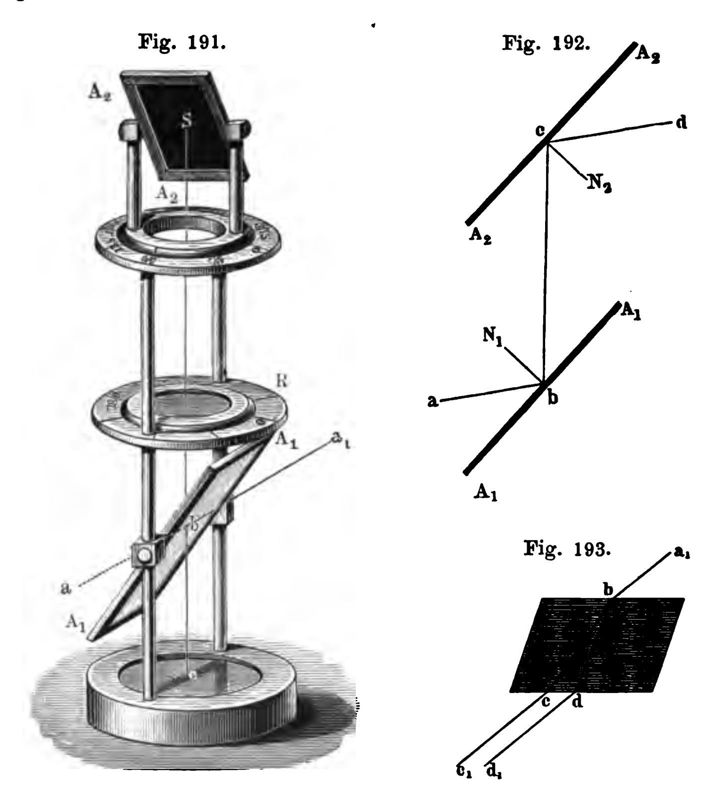
Princip. Wird ein Lichtstrahl *ab* (Fig. 192) von einer ebenen Fläche A_1 eines durchsichtigen Körpers unter einem für jeden Körper bestimmten Winkel P, dem Polarisationswinkel, reflectirt, so ist der reflectirte Strahl vollkommen polarisirt. Die Einfalls- resp. Reflexionsebene des Spiegels A, also in unserem Falle die Ebene der Zeichnung, heisst die Polarisationsebene des reflectirten Strahles.

Die Schwingungen des Lichtstrahles erfolgen nach der elastischen Theorie von Neumann und seinen Schülern in der Polarisationsebene, nach der von Fresnel senkrecht zu der Polarisationsebene. Nach der

jetzt allgemein angenommenen elektromagnetischen Lichttheorie erfolgt die elektrische Zustandsänderung (vergl. S. 216) senkrecht zur Polarisationsebene, die damit verbundene magnetische Aenderung in derselben.

Bezeichnet n den Brechungsindex, so ist der Polarisationswinkel bestimmt durch $n = tg\,P$. Für Glas ist $P =$ circa 53^0.

Der durch die ebene Fläche hindurchgehende gebrochene Strahl ist gleichfalls polarisirt, aber nicht vollkommen, er enthält einen Ueberschuss von Strahlen, deren Polarisationsebene senkrecht steht zu derjenigen der reflectirten Strahlen, daneben aber auch solche, deren



Polarisationsebene die gleiche Lage hat, wie diejenige des reflectirten. Lässt man den Strahl durch eine ganze Reihe auf einander gelegter Platten, einen sogenannten Plattensatz, gehen, so wird der letztere Antheil immer kleiner; das aus dem Plattensatze austretende Licht ist fast vollkommen polarisirt, seine Polarisationsebene steht senkrecht zur Einfallsebene.

Apparat. Der Nörremberg'sche Polarisationsapparat besteht aus einer ebenen Glasplatte $A_1 A_1$ (Fig. 191), die um eine horizontale

Axe drehbar ist, und einer schwarzen Glasplatte $A_2 A_2$, die ebenfalls um eine horizontale, aber auch um eine verticale Axe um einen an einem horizontalen Kreise messbaren Winkel gedreht werden kann. Den Aufsatz mit der Platte A_2 kann man auch durch einen Aufsatz mit einem Glasplattensatz ersetzen.

Uebung 1. 1) Man stellt den Spiegel $A_1 A_1$ so, dass der einfallende Strahl *ab* einen Winkel von 53° mit der Spiegelnormale bildet.

2) Man stellt den Spiegel $A_2 A_2$ so, dass seine Ebene parallel der des unteren $A_1 A_1$ steht (Fig. 192), dann wird das von $A_1 A_1$ reflectirte Licht auch von $A_2 A_2$ reflectirt. Blickt man auf die Platte $A_2 A_2$, so erscheint demnach das Gesichtsfeld hell.

3) Man dreht $A_2 A_2$ um 90°, so dass er die Stellung in der Fig. 191 erhält, dann erscheint das Gesichtsfeld dunkel.

4) Man dreht um 180°, dann wird es wieder hell. Dreht man um 270°, dann wird es wieder dunkel.

Bemerkung. Die Lage der Spiegelnormalen $N_2 c$ auf $A_2 A_2$ (Fig. 191) ändert sich bei der Drehung nicht gegen den einfallenden Strahl, sondern nur die Lage der Einfallsebene auf $A_2 A_2$, die durch *cb* und die Normale $N_2 c$ gelegt ist, gegen die Einfallsebene auf $A_1 A_1$, die durch *cb* und $N_1 b$ gelegt ist.

Sind die beiden Einfallsebenen einander parallel, so findet Reflexion am oberen Spiegel statt, stehen dieselben senkrecht zu einander, so findet keine Reflexion statt; durch die erste Reflexion hat das Licht also eine Seitlichkeit in Bezug auf die Einfallsebene auf $A_1 A_1$ erhalten, es ist polarisirt.

Statt dass man den Lichtstrahl *ab* (Fig. 191) nach oben reflectiren lässt, kann man auch, was meist bequemer ist, einen Strahl $a_1 b$ von $A_1 A_1$ nach unten reflectiren lassen; er fällt dann auf einen horizontalen Spiegel *e* und wird von diesem vertical nach oben reflectirt. Er verhält sich nach dem Durchgang durch den Spiegel $A_1 A_1$ beim Auftreffen auf den Spiegel $A_2 A_2$ gerade wie der Strahl *ab* nach seiner Reflexion.

Man nennt den Spiegel $A_1 A_1$ die polarisirende Vorrichtung, den Polarisator, $A_2 A_2$ die analysirende Vorrichtung, den Analysator.

Wird ein auf den Analysator fallender Lichtstrahl beim Drehen desselben ausgelöscht, so ist er polarisirt, und seine Polarisationsebene steht senkrecht zu der Polarisationsebene, d. h. der Einfallsebene des Analysators; wird er theilweise ausgelöscht, und zwar bei verschiedenen Lagen des Analysators verschieden stark, so ist er theilweise polarisirt.

Uebung 2. 1) Man ersetzt die Platte $A_1 A_2$ durch einen Glasplattensatz und blickt von oben durch denselben nach $A_1 A_1$.

2) Man dreht den Plattensatz; man erhält ein Maximum der Dunkelheit, wenn seine Einfallsebene mit der von $A_1 A_1$ zusammenfällt, ein Maximum der Helligkeit, wenn sie auf derselben senkrecht steht.

Die Polarisationsebene des Plattensatzes steht also senkrecht zu der Einfallsebene desselben.

2. Polarisation durch Doppelbrechung.

Einleitung. Fällt auf einen von einer ebenen Fläche begrenzten Körper ein Lichtstrahl, so können zwei Fälle eintreten.

1. Aus dem einfallenden Strahl entsteht nur ein gebrochener Strahl.

Körper, die sich so verhalten, heissen einfach brechende. Dahin gehören alle amorphen Körper, so lange keine Spannungen im Inneren derselben vorhanden sind (Gase, Flüssigkeiten, Glas), sowie die Krystalle des regulären Systemes.

2. Aus dem einfallenden Strahl entstehen zwei gebrochene Strahlen. Körper (Fig. 193), die sich so verhalten, heissen doppelbrechende. Dahin gehören amorphe Körper, falls in ihnen Spannungen vorhanden sind (gekühltes und gepresstes Glas); ferner alle Krystalle, die nicht dem regulären System angehören. Wir behandeln nur die Erscheinungen an Krystallen; hier sind wieder zwei Fälle zu unterscheiden:

a) Von den beiden entstehenden Strahlen gehorcht der eine stets dem Snell'schen Brechungsgesetz, für ihn ist der Brechungsindex eine Constante, man nennt ihn daher den ordentlichen oder ordinären Strahl; für den zweiten Strahl ist dies nicht der Fall, man nennt ihn den ausserordentlichen oder extraordinären Strahl.

Hierher gehören die Krystalle des quadratischen und des hexagonalen Systemes, also der Systeme mit einer ausgezeichneten Axe. Die krystallographische Hauptaxe ist auch in optischer Hinsicht ausgezeichnet.

Man nennt diese Krystalle optisch einaxige.

b) Von den beiden entstehenden Strahlen gehorcht keiner dem Snell'schen Brechungsgesetze, für beide ändert sich je nach der Lage der einfallenden Strahlen der Brechungsindex. Die hierher gehörigen Körper krystallisiren im rhombischen, monoklinen und triklinen System. Da bei ihnen zwei Richtungen in optischer Hinsicht ausgezeichnet sind, heissen sie optisch zweiaxige.

Bei den optisch einaxigen unterscheidet man wieder zwischen positiven und negativen Krystallen. Bei den positiven ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der ordinären Strahlen grösser als die der extraordinären, bei den negativen ist erstere kleiner als die letztere. Eine ähnliche Unterscheidung macht man auch bei den optisch zweiaxigen Krystallen, die wir hier aber nur erwähnen.

Trifft ein Strahl in einem Punkte A auf eine ebene Krystallfläche eines optisch einaxigen Krystalles, errichtet man in A das Einfallsloth AE, und zeichnet die durch A gehende Hauptaxe des Krystalles AB, so heisst die Ebene, die durch AE und AB geht, d. h. die Ebene, in der die Hauptaxe und das Einfallsloth liegen, der Hauptschnitt. Die Polarisationsebene des ordinären Strahles liegt parallel, die des extraordinären senkrecht zu dem Hauptschnitt.

a) Doppelbrechung im Kalkspath.

Uebung. 1) Man ersetzt die Glasplatte $A_1 A_1$ des Nörremberg'schen Apparates, Fig. 191, durch einen belegten Spiegel n, legt auf den Ring R ein Messingblech M mit einer 2 bis 3 mm weiten runden Oeffnung und auf dasselbe ein Stück durchscheinenden weissen Papiers oder ein Stück Beinglas.

2) Man dreht den Spiegel $A_2 A_2$ mit der Fassung um seine Axe, das Bild der weissen Oeffnung bleibt stets gleich hell. Das diffus durch das Papier gehende Licht ist unpolarisirt.

3) Man nimmt den Spiegel $A_2 A_2$ fort und blickt gerade von oben auf die Oeffnung in M.

4) Man legt auf M eine dicke Glasplatte. Man erhält nur ein Bild. Man dreht das Glasstück, die Lage des Bildes und seine Helligkeit bleiben ungeändert.

5) Man legt auf M ein Spaltungsstück eines Kalkspathes. Man sieht zwei Bilder der Oeffnung in M; der Kalkspath bricht doppelt, man nennt den Kalkspath daher auch Doppelspath.

6) Man dreht den Kalkspath um seine Axe, das eine Bild ändert seine Lage nicht, es ist das ordinäre, das andere ändert seine Lage, es bewegt sich in einem Kreise um das ordinäre, es ist das extraordinäre.

7) Man setzt den Analysator $A_2 A_2$ wieder ein. Man dreht denselben. Die Helligkeit der beiden Bilder wechselt von Dunkelheit zu einem Helligkeitsmaximum. Der extraordinäre und der ordinäre Strahl sind polarisirt. Ist das ordinäre Bild dunkel, so zeigt das extraordinäre ein Maximum der Helligkeit und umgekehrt. — Die Lagen der Polarisationsebenen, bei denen für das extraordinäre und das ordinäre Bild Dunkelheit eintritt, sind um 90° verschieden. Die Polarisationsebenen der beiden Strahlen liegen also senkrecht zu einander.

8) Man bestimmt die Lage der Polarisationsebene des ordinären und extraordinären Strahles im Verhältniss zu dem Krystall. Der ordinäre Strahl ist parallel, der extraordinäre senkrecht zum Hauptschnitt polarisirt.

b) Das Nicol'sche Prisma.

Apparat. Von einem Spaltungsstück eines Kalkspathes $AB'C'D$ (Fig. 194 I, a. f. S.) werden zunächst Stücke $BB'D$ und $CC'D$ abgeschliffen, das übrig bleibende Stück wird in der in der Fig. 194 II angegebenen Weise längs HH' zerschnitten. Die beiden Hälften kittet man mit Canadabalsam zusammen. Der einfallende Strahl ab zerfällt in den ordentlichen bc . . ., der wegen seines hohen Brechungsindex an der Fläche HH' nach cd total reflectirt und dadurch aus dem Gesichtsfelde entfernt wird, und den ausserordentlichen bc' . . ., der weitergeht und

in der Richtung $d'e$ austritt. Diese Vorrichtung heisst das Nicol'sche Prisma oder das Nicol. Von oben gesehen hat ein Nicol die Gestalt

Fig. 194.

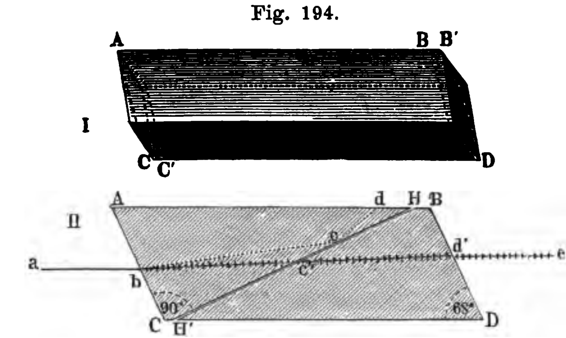


Fig. 195.

wie Fig. 195. PP ist die Polarisationsebene des durchgehenden extraordinären Strahles.

Uebung. Man entfernt von dem Nörremberg'schen Apparat den Spiegel $A_2 A_2$ und ersetzt ihn durch ein Nicol, das man dreht.

Fig. 196.

Steht PP der Einfallsebene des unteren Spiegels $A_1 A_1$ parallel, so ist das Gesichtsfeld hell; steht PP senkrecht zu derselben, so ist es dunkel.

c) Die Turmalinzange.

Princip. Fällt ein Lichtstrahl auf eine Platte von Turmalin, welche so geschnitten ist, dass die optische Axe des Krystalles den Begrenzungsflächen parallel liegt, so lässt diese nur geradlinig polarisirtes Licht durch, dessen Polarisationsebene der optischen Axe parallel ist; das senkrecht zur optischen Axe polarisirte wird im Krystall absorbirt; derselbe ist, wie man sagt, pleochroitisch[1]). Legt man daher zwei Turmalinplatten auf einander, so wirken sie wie Polarisator und Analysator, sie lassen kein Licht durch, wenn die optischen Axen beider Platten gekreuzt sind, das Maximum der Helligkeit tritt ein, wenn beide einander parallel sind.

Apparat. Man fasst zwei in Korkscheiben eingelegte Turmalinplatten (Fig. 196) in Metall-

[1]) Einen solchen Pleochroismus zeigen sehr viele Mineralien.

ringe, welche mittelst einer zangenartigen Vorrichtung federnd gegen einander gedrückt werden: Turmalinzange; der eine Turmalin ist der Polarisator, der andere der Analysator.

Uebung. Man ersetzt in dem Nörremberg'schen Apparat den oberen Spiegel durch eine horizontale Turmalinplatte: das Gesichtsfeld wird hell, wenn die optische Axe parallel zur Einfallsebene des unteren Spiegels steht.

3. Isochromatische Curven.

Princip. Bringt man zwischen zwei polarisirende Vorrichtungen Platten aus doppelbrechenden Substanzen, so erscheinen sie im parallelen Licht unter gewissen Umständen gleichmässig gefärbt, im convergenten Licht treten in ihnen aber Curven auf, die an allen Stellen eine gleiche Färbung zeigen, sogenannte isochromatische Curven, deren Gestalt und

Fig. 197.

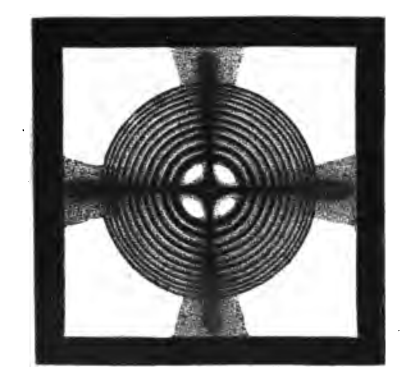


Fig. 198.



Helligkeitsvertheilung von den optischen Eigenschaften des Krystalles, aus dem die Platte geschnitten ist, abhängt, sowie von der Lage, die dieselbe gegen die Axen des Krystalles hat.

Uebung. Beobachten der isochromatischen Curven.

Man schaltet zwischen den Polarisator und Analysator, z. B. der Turmalinzange, in verschiedener Weise geschnittene Krystallplatten ein, so z. B. senkrecht zu der Axe geschnittene Kalkspathplatten, und betrachtet dieselben. Sie zeigen zwischen gekreuzten polarisirenden Vorrichtungen die Erscheinung Fig. 197, zwischen parallelen diejenige Fig. 198.

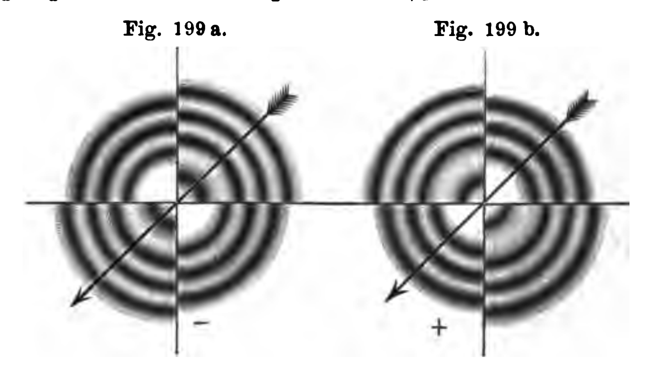
4. Bestimmung des Vorzeichens der Doppelbrechung eines optisch einaxigen Krystalles.

Princip. Legt man eine senkrecht zur Axe geschnittene Platte eines optisch einaxigen Krystalles zwischen die gekreuzten Nicols eines

Polarisationsapparates, so dass die Erscheinung Fig. 197 auftritt, und auf dieselbe eine Glimmerplatte, in der die beiden senkrecht zu einander polarisirten Strahlen einen Gangunterschied von $^1/_4\,\lambda$ erfahren, eine sogenannte Viertel-Undulationsplatte, so dass ihre Axenebene, die dem Pfeil in der Fig. 199 entspricht, um 45° gegen die Polarisationsebene der beiden Nicols geneigt ist, so ändert sich bei positiven Krystallen das Bild der isochromatischen Curven (Fig. 197) in dasjenige, wie es Fig. 199 b zeigt, bei den negativen in das, wie es Fig. 199 a darstellt.

Uebung. 1) Man legt auf eine senkrecht zur Axe geschliffene Kalkspathplatte eine Glimmerplatte von $^1/_4\,\lambda$ und beide zusammen in

Fig. 199 a. Fig. 199 b.



den Nörremberg'schen Apparat; man dreht die Glimmerplatte, bis eine der Fig. 199 a entsprechende Erscheinung eintritt.

2) Man bezeichnet die Richtung auf dem Glimmerblättchen, in der die Ringe aus einander weichen, d. h. auf der die beiden schwarzen Punkte liegen, durch eine Linie; diese Richtung ist die Axenebene des Glimmers.

3) Man nimmt den Kalkspath fort und legt den zu untersuchenden Krystall ein und bestimmt nach der oben gegebenen Regel das Vorzeichen.

Der Versuch wird auch mit einem positiven Krystall angestellt (Fig. 199 b).

IX. Drehung der Polarisationsebene.

Gebraucht wird: Cylindrische Glasröhre mit abgeschliffenen Enden; Verschlussplatten und -kappen, Fig. 203; Maasskölbchen (50 cbcm Gehalt); kleinere Waage mit Gewichtssatz; Rohrzucker, Weinsäure, Terpentinöl.

Mitscherlich's Polarisationsapparat mit Röhre und verschiedenen Quarzplatten 1,5 und 3 mm dick (senkrecht zur Axe geschnitten); Halter für die Röhren, Halter für die Platten, Fig. 201; Bunsenbrenner auf Stativ mit Schlauch; zwei durchlöcherte Platinlöffel; Stativ für die Platinlöffel; Chlornatrium und Chlorlithium; Dickenmesser; Glasplatte; Terpentinöl; Alkohol; Pyknometer; feine Waage mit Gewichtssatz; Spectralapparat; Gaslampe.

Lippich'scher Apparat und Laurent'scher Apparat mit Brenner.

Apparat von Wild mit Beleuchtungslampe; Savart'sche Doppelplatte; Nörremberg'sches Polariskop.

Apparat von Soleil-Ventzke[1]).

Einleitung. Löscht man einen durch einen Polarisator polarisirten, homogenen Lichtstrahl, z. B. von Natriumlicht, durch einen Analysator, etwa ein Nicol'sches Prisma aus und stellt zwischen Analysator und Polarisator eine Glasplatte oder einen Trog mit Wasser, so bleibt das Gesichtsfeld dunkel. Ersetzt man diese Körper durch eine senkrecht zur optischen Axe geschnittene Quarzplatte oder eine an den beiden Enden durch ebene Glasplatten verschlossene Röhre voll Zuckerlösung, so wird das Gesichtsfeld hell. Dreht man das analysirende Nicol um einen bestimmten Winkel, so erhält man wieder Dunkelheit. Die Polarisationsebene des einfallenden Lichtes hat eine Drehung erfahren, und zwar nach rechts oder links, je nachdem das analysirende Nicol nach rechts oder links gedreht werden muss, um wieder Dunkelheit zu erzielen.

Körper, die in dieser Weise auf das Licht wirken, heissen die Polarisationsebene drehende oder optisch active, und zwar rechtsdrehende (dextrogyre) und linksdrehende (laevogyre), was durch $\overset{\curvearrowright}{\alpha}$ und $\overset{\curvearrowleft}{\alpha}$ oder durch + und — angedeutet wird; das positive

---

[1]) Nach allen Methoden, mit Ausnahme der letzterwähnten, sind die Drehungen einer Quarzplatte, von Terpentinöl und zwei Zuckerlösungen zu bestimmen.

Vorzeichen entspricht einer Rechts-, das negative einer Linksdrehung. Nicht drehende Körper heissen optisch inactive.

Feste Körper untersucht man als planparallele Platten, Flüssigkeiten in Röhren, welche an beiden Seiten durch planparallele Glasplatten geschlossen sind (vgl. Fig. 203).

Die Grösse der Drehung ist direct proportional der Dicke der drehenden Schicht, sie ist abhängig von der Wellenlänge des untersuchten Lichtes und nimmt im Allgemeinen zu, wenn die Wellenlänge abnimmt. Man bezeichnet die letztere Erscheinung als Rotationsdispersion der Polarisationsebenen.

Man muss stets angeben, für Strahlen von welcher Wellenlänge die mitgetheilte Drehung gilt. Meist ist dies für das Gelborange der D-Linie der Fall, indem man eine Kochsalzflamme als Lichtquelle zu den Messungen verwendet.

Die Drehung wächst bei den meisten gelösten drehenden Substanzen mit der Concentration.

Man nennt die Drehung pro Längeneinheit (als Längeneinheit wählt man 1 dm und nicht 1 cm, um nicht zu kleine Zahlen zu erhalten) das Drehungsvermögen und bezeichnet es mit α. Das Drehungsvermögen für einen Lichtstrahl von der Wellenlänge λ, oder eine Spectrallinie L wird durch α_λ oder α_L bezeichnet.

Ist Δ die für eine Länge von l dm beobachtete Drehung, so ist:

$$\alpha = \frac{\Delta}{l}.$$

Das Drehungsvermögen ist für verschiedene Modificationen derselben Substanz gleich und entgegengesetzt.

Biot hat zuerst darauf hingewiesen, dass die auf die Längeneinheit bezogenen Drehungsvermögen der verschiedenen Substanzen nicht unter einander vergleichbar sind. Bringt man z. B. verschiedene Flüssigkeiten in dieselbe Röhre, so wirken in Folge der verschiedenen Dichte ganz verschiedene Massen auf den Strahl ein. Man berechnet daher die Wirkung, welche die Körper haben würden, wenn sie mit der Dichte 1 vorhanden wären, d. h. wenn sie so weit verdünnt wären, dass 1 cbcm 1 gr enthalten würde. Man dividirt dazu α durch die Dichte d und nennt:

$$\frac{\alpha}{d} = [\alpha]$$

das specifische Drehungsvermögen. Wählen wir als Einheit der Dichte die des Wassers bei 4° C., so ist das specifische Drehungsvermögen diejenige Drehung der Polarisationsebene, welche von 1 gr in 1 cbcm vertheilter Substanz in einer Schicht von 1 dm hervorgebracht wird.

Das moleculare Drehungsvermögen ist die Drehung, welche das Moleculargewicht, vertheilt auf 1 cbcm, in einer Säule von der Längeneinheit 1 dm hervorruft. Man erhält dasselbe durch Multiplication von $[\alpha]$ mit dem Moleculargewicht M. Um zu grosse Zahlen zu vermeiden, dividirt man noch durch 100 und setzt das moleculare Drehungsvermögen $[M]$:

$$[M] = M[\alpha]/100.$$

Gesetzmässigkeiten zwischen den Drehungen verschiedener Substanzen müssen sich auf die molecularen Drehungsvermögen beziehen.

Auch für Lösungen von activen Körpern lässt sich ein specifisches Drehungsvermögen berechnen.

Ist die Concentration der Lösung von activen Substanzen bestimmt durch die Anzahl Gramme c activer Substanz in 100 cbcm, so enthält 1 cbcm $c/100$ gr; rufen diese ein Drehungsvermögen α hervor, so würde, wenn in 1 cbcm 1 gr enthalten wäre, die Drehung sein:

$$[\alpha] = \alpha \,.\, 100/c;$$

dies ist das specifische Drehungsvermögen der gelösten Substanz.

Der Gehalt der Lösung sei nicht in dieser Weise, sondern in Gewichtsprocenten angegeben, und zwar seien z. B. P gr activer Substanz in E gr Lösungsmittel enthalten, die Lösung habe die Dichte d, dann nehmen $(P + E)$ gr Lösung $(P + E)/d$ cbcm ein, und 1 cbcm enthält: $d \,.\, P/(P + E)$ gr activer Substanz. Ruft diese Lösung eine Drehung um α Grad hervor, so erzeugt eine Flüssigkeit, die in 1 cbcm 1 gr activer Substanz enthält, eine Drehung:

$$[\alpha] = \alpha \Big/ \left(\frac{P}{P + E} d\right) = \alpha \frac{P + E}{Pd}.$$

Ist p der Procentgehalt an activer Substanz, $q = 100 - p$ die Menge Lösungsmittel in 100 Gewichtstheilen Lösung, so ist $p = 100 \,.\, P/(P + E)$, also:

$$[\alpha] = \alpha \frac{100}{pd} = \alpha \frac{100}{(100 - q)\, d}.$$

Kennt man $[\alpha]$ für irgend eine Substanz, und bestimmt α und d für eine Lösung derselben, so kann man p berechnen. Man hat eine Methode zur quantitativen Analyse; es ist:

$$p = \alpha \frac{100}{[\alpha]\, d}.$$

Bei diesen Entwickelungen geht man von der Voraussetzung aus, dass bei der Lösung einer Substanz die drehenden Theilchen nur aus einander gerückt werden, und zwar um so mehr, je verdünnter die Lösung ist, dass aber das Drehungsvermögen eines jeden einzelnen derselben nicht verändert wird. Diese Annahme ist nur angenähert

richtig. Zu praktischen Zwecken entwirft man daher Tabellen, welche die zusammengehörigen Werthe von p und $[\alpha]$ geben, oder man stellt Interpolationsformeln auf.

1. Der Mitscherlich'sche Apparat.

Apparat. Der Mitscherlich'sche Apparat (Fig. 200) besteht aus einem polarisirenden Nicol a, welches das von einer Lichtquelle kommende Licht polarisirt. Dasselbe geht durch eine Sammellinse l, vgl. die untere Figur, welche seine Strahlen parallel macht, dann durch den zu untersuchenden Körper und endlich durch das analysirende Nicol b, das entweder mit einem Kreise fest verbunden ist, mit dem es sich gegen einen feststehenden Nonius dreht, oder das, wie in Fig. 200, mit einem Nonius versehen ist, der sich über einem Kreise dreht. Zwischen den beiden Nicols lässt sich ein kleines Metalltischchen (Fig. 201) aufstellen, auf welchem durch die Federn m und n und analoge auf der Rückseite Platten q festgehalten werden können.

Fig. 200.





I. Versuche mit Quarzplatten.

a) Mit homogenem Natriumlicht.

Uebung. 1) Man stellt vor a eine Natriumflamme, welche der D-Linie des Sonnenspectrums entsprechendes Licht liefert.

2) Man dreht den Analysator. Bei einer Drehung um 360 Grad tritt zweimal Dunkelheit ein. Dann sind die Nicols gekreuzt. (Man überzeugt sich, dass in diesen Fällen die Längsdiagonalen PP ihrer Querschnitte senkrecht zu einander stehen.)

Fig. 201.

3) Man schaltet zwischen die gekreuzten Nicols, also wenn das Gesichtsfeld dunkel ist, eine Glasplatte ein; das Gesichtsfeld bleibt dunkel.

4) Man stellt zwischen die gekreuzten Nicols eine senkrecht zur Axe geschnittene Quarzplatte q so, dass sie senkrecht zu der Verbindungslinie der beiden Nicols steht. Das Gesichtsfeld wird hell.

5) Man dreht das Nicol nach rechts oder links und beobachtet, wo **zuerst** Dunkelheit eintritt. Danach bestimmt sich, wenn man hinlänglich dünne Platten anwendet, ob der Körper rechts- oder linksdrehend ist.

6) Man liest die Stellung ab bei Dunkelheit ohne Platte [1] a,
dasselbe geschieht mit Platte . . . . b,
Grösse der Drehung Δ_1 . . . . . . $\Delta_1 = b - a$.
Man misst die Dicke der Platte mit dem Mikrometer l dm.
Man führt dasselbe für eine n mal so dicke
Platte aus, die Drehung ist . . . $\Delta_n = n(b - a)$.

Die Drehung wächst proportional der Dicke der Schicht. Das Drehungsvermögen α_D der Quarzplatte ist also $\alpha_D = (b - a)/l$.

7) Man bestimmt α'_D für eine der ersten entgegengesetzt drehende Quarzplatte; es ist $\alpha'_D = \alpha_D$.

b) Mit homogenem Lithiumlicht.

1) Man bringt in die Flamme des Bunsenbrenners Chlorlithium und absorbirt die gelben Strahlen des stets vorhandenen Natriums durch ein rothes Glas und verfährt wie oben, dadurch finden wir α_{Li}.

Es ist: $\alpha_{Li} < \alpha_D$.

Die Drehung ist für die verschiedenen Farben verschieden.

Beispiel: Für Na-Licht $l_1 = 0{,}015$ dm; $a_1 = 5^0$, $b_1 = 38^0$; $\Delta_1 = b_1 - a_1 = 33^0$, $l_2 = 0{,}030$ dm; $a_2 = 5^0$, $b_2 = 71^0$; $\Delta_2 = b_2 - a_2 - 66^0 = 2 (b_1 - a_1)$. $\alpha_D = 33/0{,}015 = 2200^0$ für 1 dm Dicke, $\alpha_D = 22^0$ (für 1 mm Dicke genauer Werth 21,67).

Für Li-Licht $l = 0{,}015$ dm: $a = 5^0$, $b = 29^0$, $\Delta = 24^0$, $\alpha_{Li} = 16^0$ für 1 mm Dicke.

c) Mit weissem Licht.

1) Man stellt vor a eine leuchtende Gasflamme.

2) Man stellt das analysirende Nicol so, dass das Gesichtsfeld möglichst dunkel erscheint. Stellung a.

3) Man schaltet einen rechtsdrehenden Quarz ein und dreht das analysirende Nicol nach rechts. Das Gesichtsfeld wird nicht vollkommen dunkel, sondern es erscheint der Reihe nach grünblau, blauroth (purpur), orange, roth. Bei dem Auftreten der blaurothen Farbe (der sog. Uebergangsfarbe, empfindlichen Farbe „teinte de passage") ist das Gesichtsfeld am dunkelsten und der Wechsel der Nüancen beim Drehen des Nicols nach rechts und links sehr bedeutend; dreht man nach der Nulllage, so wird die Farbe blau, dreht man nach der anderen Seite, so wird sie roth. Die Drehung für die Uebergangsfarbe wird mit α_j (α_{jaune}) bezeichnet.

---

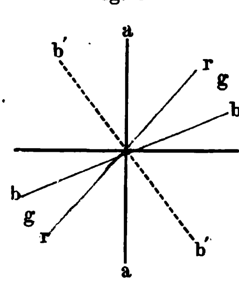
[1]) Alle diese Einstellungen werden mehrfach wiederholt und zwar so, dass man gleich oft von der einen und der anderen Seite von Hell zu Dunkel übergeht; das Mittel aller Ablesungen wird genommen und den Rechnungen zu Grunde gelegt.

4) Man liest die Stellung des Analysators für die Stellung, bei der das Gesichtsfeld blauroth ist, ab: b_1.

Es ist $\alpha_j = b_1 - a$ grösser als $\alpha_D = b - a$ für die D-Linie.

Bemerkung. Der Farbenwechsel erklärt sich aus der Dispersion der Polarisationsebene. Für die verschiedenen Farben ist die Lage derselben nach dem Durchgang der Strahlen durch die drehende Substanz verschieden. Ist sie z. B. ursprünglich a, so ist sie nach dem Durchgange durch eine rechtsdrehende Substanz für die rothen Strahlen rr, für die gelben gg, für die blauen bb (vgl. Fig. 202), also wird bei einer bestimmten Lage des Analysators $b'b'$ von allen im Weiss enthaltenen Farben nur eine, z. B. das Blau bb, vollkommen ausgelöscht; die anderen mehr oder weniger ausgelöschten liefern eine Mischfarbe, welche zu der ausgelöschten complementär ist. Am dunkelsten ist das Gesichtsfeld, wenn der hellste Theil des Spectrums, das Gelb, ausgelöscht ist. Das Gesichtsfeld erscheint in dem oben erwähnten eigenthümlichen blaurothen Ton der „Uebergangsfarbe“. Bei kleinen Drehungen aus dieser Lage treten die lebhaftesten Farbenwechsel auf; denn dreht man das Nicol nach der Seite, wo das Blau ausgelöscht wird, also von der Nulllage fort, so muss das Gesichtsfeld roth, dreht man es zu der Nulllage hin, so muss es blau erscheinen.

Fig. 202.

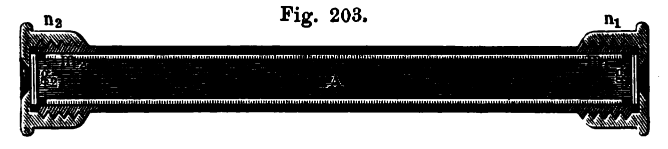


Da $(b - a) = \alpha_D$ dem Orange, $(b_1 - a) = \alpha_j$ dem Gelb entspricht, so muss, da das Gelb stärker gedreht wird als das Orange, $\alpha_j > \alpha_D$ sein. Bei dem Zucker z. B. ist $\alpha_j : \alpha_D = 1{,}13$.

II. Versuche mit ungemischten Flüssigkeiten.

Zu allen Versuchen mit flüssigen, drehenden Substanzen dienen Rohre (Fig. 203). Auf die an beiden Enden eben und genau senkrecht zu ihrer Axe abgeschliffene Glasröhre A sind Messingfassungen m_1, m_2

Fig. 203.



mit Gewinden aufgekittet; über dieselben schraubt man Ueberfangsschrauben $n_1 n_2$, welche die Glasplatten g_1 und g_2 gegen die abgeschliffenen Enden schwach andrücken.

Uebung. 1) Man reinigt das Rohr, legt die Platte g_1 auf und schraubt n_1 über m_1, dann stellt man das Rohr vertical, füllt dasselbe mit Flüssigkeit, bis eine Kuppe vorhanden ist, und legt die zweite Glas-

platte g_2 oben auf, so dass keine Luftblase bleibt; dann schraubt man n_2 über m_2 und wischt sorgfältig Glasplatten und Röhre ab.

2) Man legt die Röhre in den Apparat ein und wartet, bis sich die Temperatur in demselben ausgeglichen hat, weil sonst das Bild verwaschen erscheint.

3) Man liest ab für homogenes gelbes Licht:

Lage des analysirenden Nicols ohne Röhre . . . . . a [1]).

" " " " mit " . . . . . . b.

Länge der Röhre . . . . l dm.

Dann ist das Drehungsvermögen . . . . $\alpha_D = (b - a)/l$.

4) Man bestimmt mit dem Pyknometer die Dichte . . . . d.

Beispiel: Terpentinöl. 1) $a = 1^0$; 2) $b = 65$ nach rechts. $b - a = 64$. $l = 2$ dm; $\alpha_D = 32$. 3) $d = 0{,}87$. $[\alpha]_D = 37$. Das moleculare Drehungsvermögen der hier verwendeten Terpentinölsorte ist also, da für $C_{10}H_{16}$ $M = 136$ ist, $37{,}0 \times 136/100 = 50$.

III. Versuche mit Lösungen.

Uebung. 1) Man stellt die Zuckerlösungen folgendermaassen her. In einer 50 cbcm-Flasche werden 5 gr resp. 10 gr Zucker abgewogen, darauf Wasser zugesetzt und nach dem Lösen bis zur Marke aufgefüllt, dann hat man Lösungen, die 10 und 20 gr in 100 cbcm enthalten, oder 100 und 200 gr im Liter. Bei anderen Concentrationen verfährt man analog.

2) Man bestimmt die Drehungen für die beiden Lösungen.

3) Man bestimmt die Dichten für dieselben.

Berechnung. Mit der Zuckerlösung von 10 gr Gehalt in 100 cbcm ermittelt man $[\alpha]_D$ und mit diesem Werthe von $[\alpha]_D$ berechnet man für die Lösung mit 20 gr den Procentgehalt p.

Beispiel. Eine Zuckerlösung, die $c = 10$ gr Zucker in 100 cbcm enthielt, gab bei einer Rohrlänge von 2 dm die Drehung $13{,}3^0$, also ist $\alpha = \frac{1}{2}\,13{,}3$ und $[\alpha]_D = 13{,}3 \times 100/(2 \times 10) = 66{,}5$.

Eine andere Lösung $d = 1{,}07$ ergab bei $l = 2$ dm, $\alpha_2 = \frac{1}{2}\,26{,}5^0$. Der Procentgehalt dieser Lösung war also $p = 26{,}5 \times 100/(2 \times 66{,}5 \times 1{,}07) = 18{,}6$ und $c = 20$ Proc.

Das moleculare Drehungsvermögen des Zuckers $C_{12}H_{22}O_{11}$ ($M = 342$) ist: $66{,}5 \times 342/100 = 227$.

2. Lippich'scher Halbschattenapparat.

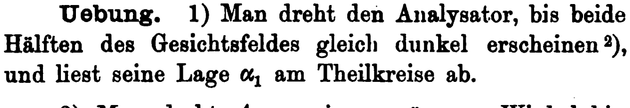
Apparat. Die (Fig. 204) von der Lichtquelle kommenden Strahlen gehen durch eine biconvexe Linse C, durchsetzen erst ein

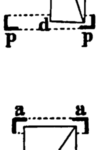
---

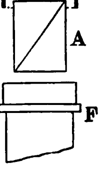
[1]) Zweckmässig ist es, auch die entsprechende Lage des Nicols mit Röhre, aber ohne Füllung, zu bestimmen, da die Glasplatten in Folge von Spannungen manchmal drehen. Die hierbei beobachtete Lage des Nicols tritt dann an Stelle von a.

Nicol'sches Prisma P, dann ein zweites P_1, das die Hälfte des Gesichtsfeldes von P bedeckt, ein Diaphragma pp, eine Blende aa, den Analysator A, ein Galilei'sches Fernrohr F. Die Linse C wird so gestellt, dass sie ein reelles Bild der Lichtquelle in der Ebene von aa entwirft, das Galilei'sche Fernrohr wird auf die Kante d des Polarisators P_1 eingestellt.

Fig. 204.







Man neigt die Polarisationsebene von P_1 ein wenig gegen diejenige von P durch Drehen von P_1, dann gehen durch die beiden Hälften des Gesichtsfeldes von pp zwei Strahlenbündel, deren Polarisationsebenen unter einem kleinen Winkel gegen einander geneigt sind[1]).

Uebung. 1) Man dreht den Analysator, bis beide Hälften des Gesichtsfeldes gleich dunkel erscheinen[2]), und liest seine Lage α_1 am Theilkreise ab.

2) Man dreht A um einen grösseren Winkel hin und her und überzeugt sich, dass die dabei auftretenden Erscheinungen die gleichen sind, wie beim Laurent'schen Apparate (s. w. u.).

3) Man legt eine Zuckerlösung zwischen pp und aa ein und dreht den Analysator, bis wieder gleiche Dunkelheit vorhanden ist: Lage α_2.

Die Drehung ist dann: $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$.

3. Das Laurent'sche Polaristrobometer (Fig. 205 u. 206).

Apparat. Als Lichtquelle dient bei diesem Apparate ein Bunsenbrenner VA mit starkem Zug, in dessen Flamme Chlornatrium verdampft. Die Strahlen gehen durch die Blende a (Fig. 206), werden durch die Linse e parallel gemacht, durch ein Nicol d polarisirt und gehen dann durch ein Diaphragma f, dessen eine Hälfte mit einer parallel zur Axe geschliffenen Quarzplatte bedeckt ist. Das Diaphragma a ist meist noch mit einer Platte aus Kaliumbichromat bedeckt, um die blauen Strahlen der Bunsenflamme abzuhalten. Ein Bild des Diaphragmas giebt Fig. 207 I. Die linke Hälfte ist durch die Quarzplatte Q bedeckt, die rechte dagegen frei.

---

[1]) Bei den neueren Apparaten dieser Construction setzt man zwei Prismen P_1 mit parallelen Polarisationsebenen ein, zwischen denen das von P kommende Licht bei d hindurchgeht (Halbschattenapparate mit „dreitheiligem" Gesichtsfelde).

[2]) Dies ist indess nicht genau dann der Fall, wenn die Polarisationsebene des analysirenden Nicols auf der Halbirungslinie des Winkels der Polarisationsebenen von P und P_1 senkrecht steht, da die Polarisationsebene der durch P gegangenen Strahlen beim Durchgang durch P_1 nicht nur eine Aenderung in der Lage erfährt, sondern die Strahlen selbst auch geschwächt werden.

Die Richtung der Krystallaxe ist parallel derjenigen Kante *MN* der Quarzplatte, welche die Oeffnung des Diaphragmas halbirt. Die Dicke der Platte ist so gewählt, dass die parallel und senkrecht zur Axe der Quarzplatte polarisirten (vgl. S. 316), durch sie hindurchgehenden Strahlen des Natriumlichtes einen Gangunterschied von einer halben Wellenlänge erleiden. Ist dann (Fig. 207) die Polarisationsebene *OB* des nicht durch die Quarzplatte gegangenen Lichtes um

Fig. 205.

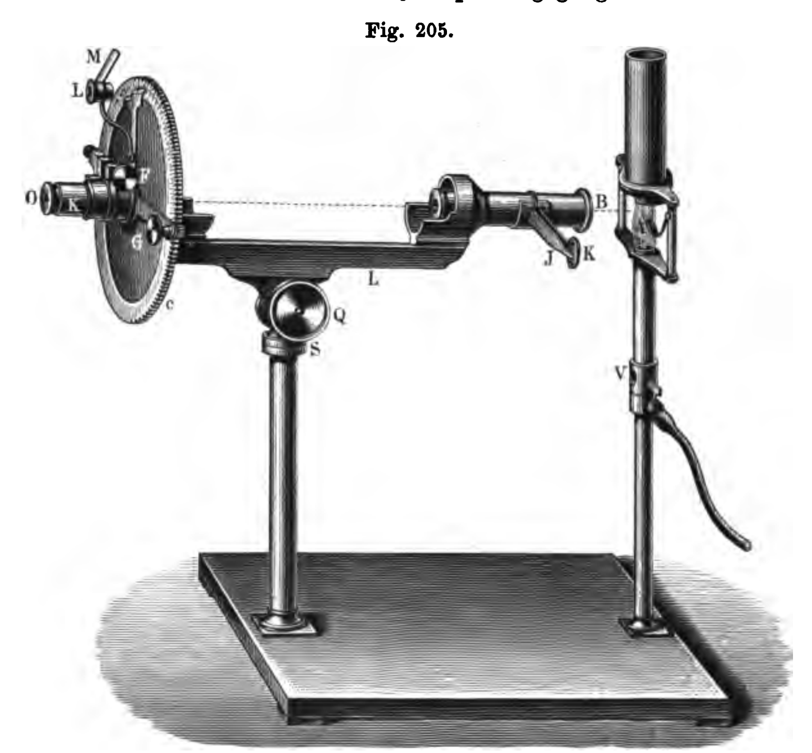


Fig. 206.

i h g p p f d e a

einen Winkel α gegen *OA* geneigt, so ist diejenige des durch die Quarzplatte gegangenen *OB'* um denselben Winkel α gegen *OA* geneigt, aber nach der anderen Seite hin von *OA*. Zwischen die Quarzplatte und das analysirende Nicol *g* wird die mit der zu untersuchenden Substanz gefüllte Röhre *pp* oder die Substanz selbst geschaltet. Ein Galilei'sches Fernrohr *hi* dient zum Einstellen auf die Quarzplatte.

Das polarisirende Nicol *d* ist mit einem Arme *J* (Fig. 205) ver-

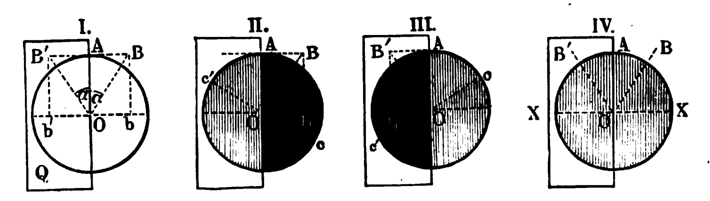
bunden, der sich längs einer kleinen Theilung K bewegen lässt. Man kann dadurch die Polarisationsebene von d entweder parallel AO stellen oder gegen AO um einen kleinen Winkel α neigen. Das analysirende Nicol g ist mit dem Fernrohr hi mittelst des Armes G drehbar. Bei der Drehung bewegt sich ein mit einem Kreisnonius versehener Arm auf der Kreistheilung, die Stellung des Nonius wird durch die Lupe L abgelesen [1]).

Uebung. 1) Man stellt die Polarisationsebene P des Polarisators durch Drehen an dem Arm J parallel AO, d. h. parallel zu der Axe des Quarzes; dann erscheinen bei jeder Stellung des analysirenden Nicols die beiden Hälften des Gesichtsfeldes gleich hell. Die Intensität schwankt beim Drehen um 180° zwischen einem Maximum und Null.

2) Man dreht den Polarisator aus der ersten Lage, so dass seine Polarisationsebene OB einen Winkel α mit OA bildet. Die durch die beiden Hälften des Diaphragmas gegangenen Strahlen sind polarisirt, ihre Polarisationsebenen OB und OB' bilden einen Winkel 2α mit einander.

Man dreht das analysirende Nicol g, dessen Polarisationsebene $c'c$ entspreche, dann treten die Erscheinungen in II, III, IV ein. In der

Fig. 207.



Lage II wird das durch die rechte Seite gegangene Licht, in der Lage III das durch die linke Seite des Diaphragmas gegangene Licht ausgelöscht. In der Lage IV, die zwischen beiden Stellungen II und III liegt, in der die Polarisationsebene des analysirenden Nicols die Lage XX hat, gehen von dem nach OB und OB' polarisirten Licht gleiche Bruchtheile durch das analysirende Nicol, die beiden Hälften erscheinen gleich dunkel.

Diese Stellung dient als Nullstellung. Bei einer kleinen Drehung nach rechts und links aus dieser Lage werden abwechselnd die linke und die rechte Seite dunkel, man kann die Lage daher sehr genau fixiren [2]).

[1]) Wo die Bezifferung der Scalentheile des Theilkreises von einem bestimmten Nullpunkte an, wie hier, nach beiden Seiten wächst, trägt der bewegliche Kreisbogen zwei Nonien, die von einem Nullpunkte aus nach beiden Seiten hin mit wachsenden Ziffern versehen sind. Es ist derjenige Nonius zu benutzen, dessen Bezifferung mit der betreffenden Scala gleichläuft.

[2]) In einer Stellung, die um 90° von dieser Mittelstellung IV entfernt ist, sind abermals beide Hälften gleich hell, man muss aber sehr viel weiter

Je grösser die zu Gebote stehende Helligkeit, je klarer die untersuchte Lösung ist, um so kleiner kann man α machen und um so grösser ist die Empfindlichkeit.

Die Einstellung auf gleiche Helligkeit ist genauer als diejenige auf Dunkelheit beim Mitscherlich'schen Apparate, weil in den beiden Hälften des Gesichtsfeldes die Helligkeiten bei der Drehung des analysirenden Nicols sich in entgegengesetztem Sinne ändern; die der einen nimmt zu, wenn die der anderen abnimmt.

3) Man stellt auf gleiche Helligkeit der beiden Hälften und schaltet zwischen analysirendes und polarisirendes Nicol eine Quarzplatte ein; dann verschwindet die Gleichheit.

4) Man dreht das analysirende Nicol, bis man wieder Gleichheit zwischen den beiden Dunkelstellungen erhält, die gemessene Drehung des Analysators giebt die gesuchte Drehung. Durch die drehende Substanz wird in den beiden Hälften des Gesichtsfeldes die Polarisationsebene OB und OB' um gleichviel gedreht, man muss also, um die zu beiden symmetrische Stellung der Polarisationsebene des Analysators wieder zu erhalten, diesen um ebenso viel nachdrehen.

5) Man schaltet mit Zuckerlösung gefüllte Röhren ein und verfährt wie bei der Quarzplatte.

Bemerkung. Der Laurent'sche Apparat ist nur für die eine Spectralfarbe anwendbar, bei der der Gangunterschied in der Quarzplatte für die senkrecht und parallel zu der Axe polarisirten Strahlen $^1/_2\,\lambda$ beträgt. Der Lippich'sche Apparat ist für alle Farben anwendbar.

4. Das Wild'sche Polaristrobometer.

Vorübung. 1) Man stellt den Mitscherlich'schen Apparat so auf, dass das mit dem Kreise versehene Nicol als Polarisator dient. Vor demselben wird eine Natriumflamme aufgestellt.

2) Zwischen die gekreuzten Nicols wird in der Nähe des Analysators eine Savart'sche Doppelplatte gebracht, sie besteht aus zwei über einander gekitteten Kalkspathplatten, deren Hauptaxen unter 45° gegen die Grenzflächen geneigt sind, und deren Hauptschnitte einen Winkel von 90° mit einander bilden.

Fig. 208.



3) Die Platte wird um die auf ihrer Fläche senkrecht stehende Linie so gedreht, dass die in dem Gesichtsfelde auftretenden schwarzen Streifen, Fig. 208 (isochromatischen Curven, S. 319), verschwinden. Nur bei dieser Lage a der Polarisationsebene des einfallenden Lichtes verschwinden die Streifen. Man dreht den Polarisator, die Streifen erscheinen wieder. Dreht man

drehen, um für eine der beiden Hälften bis zur Dunkelheit zu gelangen, die Einstellung ist also viel weniger empfindlich.

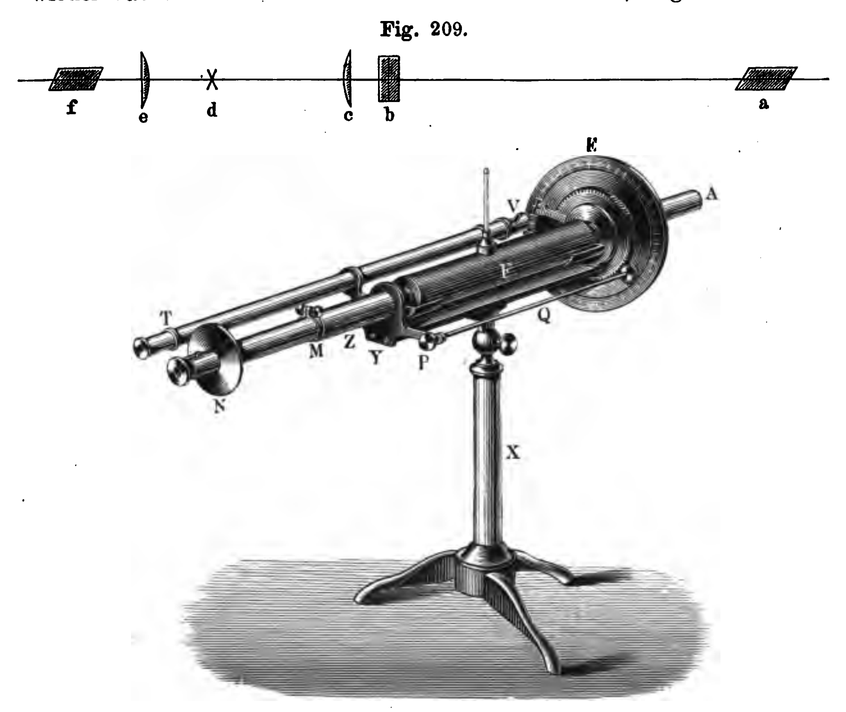
schnell durch die Lage *a* hindurch, so wechseln die Streifen plötzlich ihre Lage, indem an die Stelle der früheren Helligkeitsmaxima Helligkeitsminima treten.

4) Man liest die Stellung des Polarisators, bei der die Streifen verschwunden sind, ab; sie sei *a*.

5) Man schaltet zwischen Polarisator und Doppelplatte eine beispielsweise linksdrehende Quarzplatte ein; die Streifen erscheinen wieder.

6) Man muss das polarisirende Nicol nach rechts drehen, um wieder das Verschwinden der Streifen herbeizuführen; Lage *b*.

Fig. 209.



Die Drehung der Platte beträgt dann $b - a$ Grade nach links. Man hat durch die Rechtsdrehung des Nicols die Linksdrehung der Polarisationsebene durch die Quarzplatte compensirt.

Apparat. Als Lichtquelle dient bei diesem Apparate die durch Chlornatrium gefärbte Flamme eines Bunsenbrenners. Der Apparat (Fig. 209) besteht aus dem mit einem Theilkreise verbundenen polarisirenden Nicol *a*, das durch die Triebstange *Q* mit dem Knopf *P* an einem Nonius vorbeigedreht wird, aus dem Lager für die Röhre *F*, der Savart'schen Platte *b*, dem analysirenden Nicol *f* und einem Fernrohr *ce*, mit dem man die Savart'sche Doppelplatte betrachtet. Die

in der Platte entstehenden Streifen verschwinden bei feststehendem Analysator, wenn die Lage der Polarisationsebene des einfallenden Lichtes durch Drehen an *P* eine bestimmte geworden ist. Dreht man den Knopf *P* nach links, so dreht sich der Kreis *E* nach rechts; einer linksdrehenden Substanz entspricht daher auch eine Linksdrehung an *P*. Den Kreis *E* liest man durch das Fernrohr *T* ab, er wird durch eine Lampe, die neben *V* steht, beleuchtet, ihre Strahlen werden durch einen um 45° gegen *TV* geneigten Spiegel auf die Theilung geworfen.

Uebung. 1) Man stellt durch Drehen an dem Knopfe *P* das polarisirende Nicol auf Verschwinden der Streifen in der Doppelplatte ein und liest die Stellung des Kreises *E* ab: *a*.

2) Man schaltet die drehende Substanz ein; die Streifen erscheinen.

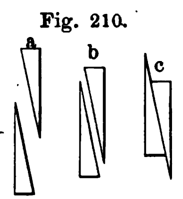
3) Man dreht den Knopf *P* der Triebstange, bis die Streifen wieder verschwinden: Ablesung *b*.

Die Drehung ist: *b* — *a*.

5. Das Saccharimeter von Soleil-Ventzke.

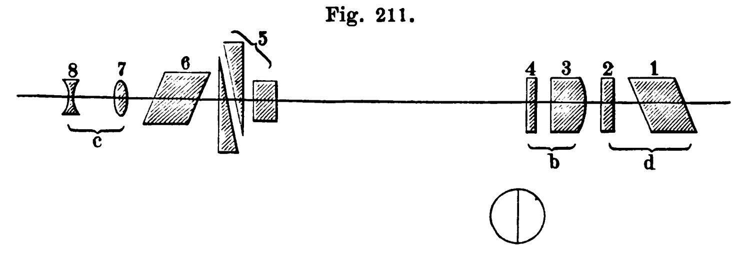
Princip. Der Soleil-Ventzke'sche Apparat dient zur Untersuchung des Gehaltes von Zuckerlösungen; bei ihm wird die durch eine gewisse Menge der Zuckerlösung bewirkte Rechtsdrehung der Polarisationsebene durch Einschaltung einer linksdrehenden Quarzplatte von gewisser Dicke compensirt. Die Quarzplatte besteht aus zwei aus linksdrehendem Quarz geschnittenen Keilen (Fig. 210 a, b, c), welche beim Uebereinanderschieben eine Platte von wechselnder Dicke geben.

Fig. 210.



Apparat (Fig. 211). Das von *a* einfallende weisse Licht einer Gaslampe wird durch das Nicol'sche Prisma 1 polarisirt. Durch die

Fig. 211.



senkrecht zur optischen Axe geschnittene Quarzplatte 2 wird die Polarisationsebene der verschiedenen Farben verschieden stark gedreht (vergl. die Versuche S. 324). 3 ist eine polarisirende Vorrichtung mit vertical gestelltem Hauptschnitt [1]) (achromatisirtes Kalkspathprisma), welche

[1]) Bei manchen Apparaten sind die beiden Theile 1 und 2, durch deren gegenseitige Stellung die Farbe, in der das Gesichtsfeld erscheint, bedingt ist, am anderen Ende des Apparates angebracht, 3 ist der eigentliche Polarisator.

auf der einen Seite convex geschliffen ist, um die durch die Blende bei *d* gehenden Strahlen parallel zu machen. Die Strahlen gelangen auf die Doppelquarzplatte 4, die aus einer linksdrehenden und einer rechtsdrehenden, an einer verticalen Fuge zusammenstossenden Hälfte besteht (vergl. die darunter skizzirte Vorderansicht). Diese Platte ist 3,75, bei manchen Apparaten 7,50 mm dick. 5 sind die Quarzkeile, die durch eine Schraube *B* mittelst zweier Zahnstangen in entgegengesetzter Richtung bewegt werden können, und die ihnen vorgesetzte, rechtsdrehende Quarzplatte. Die Stellung der Quarzkeile wird an einer mit Nonius versehenen Scala abgelesen.

Zwischen 4 und 5 wird die die Zuckerlösung enthaltende Röhre eingeschaltet. Bei 6 ist ein zweites als Analysator dienendes Nicol'sches Prisma eingeschaltet, welches so steht, dass man durch das Galilei'sche Fernrohr 7 und 8, bei richtiger Einstellung des Apparates, beide Hälften von 4 gleich, und zwar in der empfindlichen Farbe gefärbt sieht.

Dadurch, dass die Dicken der Doppelquarzplatte 4 so gewählt sind, dass die mittleren Spectralfarben um 90° (bei 3,75 mm Dicke), bezw. um 180° (bei 7,50 mm Dicke) in der einen Hälfte nach rechts, in der anderen nach links gedreht erscheinen, sind beide Hälften bei gekreuzten bezw. parallelen Polarisationsebenen von Polarisator und Analysator 6 immer gleich gefärbt; durch Drehen an 2 und 3 wird bewirkt, dass beide Hälften in der empfindlichen Farbe erscheinen. Wird zwischen 4 und 5 eine rechtsdrehende Substanz eingeschaltet, so muss, um die beiden Hälften wieder gleichfarbig zu machen, eine grössere Dicke der linksdrehenden Quarzkeile, bei linksdrehenden Substanzen eine geringere Quarzdicke eingeschaltet werden.

1. Aichen der Scala. Eine Rohrzuckerlösung, welche 16,35 g Rohrzucker in 100 cbcm Lösung enthält, dreht, in 2 dm dicker Schicht, die Polarisationsebene aller Farben wie eine Quarzplatte von 1 mm Dicke. Dies benutzt man bei der Aichung der an dem Soleil-Ventzke'schen Apparat angebrachten Scala, sofern dieselbe nicht schon direct den Zuckergehalt angiebt.

Uebung. 1) Man stellt eine Rohrzuckerlösung von 16,35 gr in 100 cbcm Lösung (S. 327) her und füllt damit eine 2 dm lange Röhre. Gestattet der Apparat nur das Einlegen von 1 dm langen Röhren, so nimmt man die Concentration der Lösung doppelt so gross.

2) Durch Drehen der Schraube *B* färbt man die beiden Gesichtshälften zunächst angenähert gleich.

3) Durch Drehen an dem Theile *d*, Fig. 211, stellt man die Uebergangsfarbe (S. 325) in beiden Gesichtshälften her.

4) Man macht eine Reihe von Einstellungen auf gleiche Färbung der beiden Hälften, liest die Stellung des Nonius an der Scala ab: a_1, $a_2 \ldots$, und nimmt das Mittel a.

5) Man legt die Röhre ein und bestimmt wieder einige Male die Noniusstellung A_1, A_2... bei Farbengleichheit und nimmt das Mittel A. Dann ist die Drehung einer 1 mm dicken Quarzplatte, oder einer 16,35 procentigen Rohrzuckerlösung $D = A - a$.

Beispiel: $a = 5$; links $A = 95$; rechts $D = 100$.

2. Bestimmung des Procentgehaltes von Zuckerlösungen. Giebt eine Zuckerlösung vom Procentgehalt p Farbengleichheit der beiden Gesichtshälften bei der Noniusstellung x, so ist

$$p = x . 16,35/100.$$

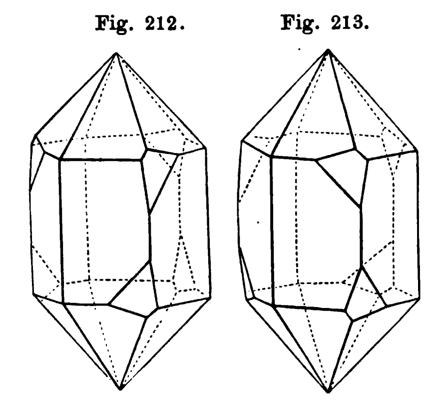
Die Uebung gestaltet sich wie unter 1.

Bemerkung. Ist der Procentgehalt p so gross, dass die grösste Dicke der Quarzkeile zur Compensation der Drehung nicht ausreicht, so verwendet man eine entsprechend kürzere Röhre.

Allgemeines.

Man theilt die drehenden Körper in zwei Classen:

1. Körper, die in krystallisirter Form (aus dem regulären und den optisch-einaxigen Systemen) die Polarisationsebene drehen und diese Eigenschaft verlieren, sobald sie durch Schmelzen oder Lösen in den amorphen Zustand übergeführt werden. Bei ihnen rührt die Drehung von der Art des Aufbaues der Krystalle aus den Molecülen her.


Fig. 212. Fig. 213.

Die optisch-einaxigen Krystalle zeigen nur für Strahlen, die sie in der Richtung der Hauptaxe und in Richtungen, die ganz wenig gegen diese geneigt sind, durchsetzen, eine Drehung. Von diesen Körpern lassen sich meist rechts- oder linksdrehende Krystalle darstellen, an denen in vielen Fällen eine Hemiëdrie bezw. Tetartoëdrie auftritt, die bei den rechtsdrehenden Körpern eine rechte, bei den linksdrehenden eine linke ist. So bei Quarz, Fig. 212 und 213, Natriumperjodat, Bleihyposulfat, Guanidincarbonat, Maticocampher etc.

2. Körper, die auch als Flüssigkeiten oder in Lösungen oder als amorphe nach dem Schmelzen erstarrte Körper oder im dampfförmigen Zustande eine Drehung zeigen. Diese Substanzen sind sämmtlich Kohlenwasserstoffverbindungen. Sie zeigen im flüssigen und gasförmigen Zustande ein nahezu gleiches specifisches Drehungsvermögen. Die Drehung ist durch eine besondere Anordnung der Atome im Molecül

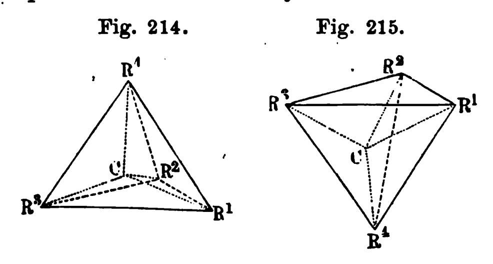
und nicht durch eine besondere Anordnung der Molecüle zu Molecülaggregaten bedingt.

Zahlreiche drehende Substanzen entstammen dem pflanzlichen oder thierischen Organismus, oder sind durch chemische Processe aus solchen Substanzen gewonnen. In neuerer Zeit hat man auf rein synthetischem Wege drehende Substanzen dargestellt, so Jungfleisch Weinsäure, Lewkowitsch Mandelsäure, Ladenburg Coniin, E. Fischer Traubenzucker u. s. f.

Viele inactive Körper können als eine Mischung, resp. eine Verbindung zweier activer angesehen werden, die mit dem betrachteten Körper isomer sind. So entsteht die inactive Traubensäure aus Rechts- und Linksweinsäure. Um aus dem inactiven, aus zwei activen gebildeten Körper die activen abzuscheiden, schlägt man verschiedene Wege ein:

1) Man krystallisirt Salze oder Verbindungen des betreffenden Körpers und sucht die Krystalle mit rechts- und linkshemiëdrischen Flächen aus. Man kann auch eine übersättigte Lösung des betreffenden Körpers mit einem rechts- oder linkshemiëdrischen Krystall berühren, dann scheidet sich nur die ihm entsprechende Modification ab. So bei dem Natriumammoniumsalz der natürlichen Traubensäure. 2) Man verbindet den Körper (etwa Traubensäure) mit einem anderen activen Körper (etwa Cinchonin). Dann sind oft die Löslichkeitsverhältnisse der beiden entstehenden Modificationen verschieden. 3) Man versetzt die Substanz mit Pilzen etc. und einer geeigneten Nährflüssigkeit. Dann zersetzen die Pilze überwiegend die mit dem einen Drehungsvermögen begabte Substanz. Je nach der Art des die Zersetzung einleitenden Pilzes sind die erzeugten Modificationen verschieden. Lewkowitsch hat z. B. durch Einsäen von *Penicillium glaucum* aus inactiver Mandelsäure Rechtsmandelsäure gewonnen, durch dasjenige von *Saccharomycetes ellipsoïdeus* Linksmandelsäure erhalten.

Fig. 214. Fig. 215.



Zur Erklärung der Drehung nimmt man an, dass der Lichtäther um die Körpermolecüle in bestimmter Weise geordnet ist; dies erfordert einen bestimmten molecularen Bau der Substanz.

Steht bei einem Körper von dem Typus CR_4 das Kohlenstoffatom in der Mitte eines Tetraëders und die vier mit demselben verbundenen verschiedenen Radicale $R_1 R_2 R_3 R_4$ an den vier Ecken desselben, so kann eine solche Combination $CR_1 R_2 R_3 R_4$ (Fig 214 und 215) in zwei enantiomorphen Formen auftreten, die sich wie Gegenstand und Spiegelbild zu einander verhalten. Verbindet man eines der Elemente $R_1 R_2 R_3 R_4$

etwa R_4, mit dem C-Atom und blickt in der Richtung der Verbindungslinie nach der entgegengesetzten Tetraëderfläche, so sind bei der einen Form die anderen Elemente im speciellen Falle $R_1 R_2 R_3$ im Sinne des Uhrzeigers angeordnet, bei der anderen Form im entgegengesetzten Sinne. Die beiden Gebilde können nicht zur Deckung gebracht werden.

Asymmetrische Kohlenstoffatome sind diejenigen, bei denen die vier Valenzen durch verschiedene Elemente oder Gruppen gesättigt sind, sie werden mit *C bezeichnet.

Drehende organische Körper enthalten ein asymmetrisches Kohlenstoffatom. Die Thatsachen haben bisher diese Hypothese insofern bestätigt, als keine drehende Substanz ohne asymmetrisches Kohlenstoffatom bekannt ist. Dagegen drehen viele Körper mit asymmetrischen Kohlenstoffatomen nicht. Die Asymmetrie der Kohlenstoffatome ist wohl nur eine der Bedingungen zum Entstehen der Activität.

Wir geben einige Beispiele für active Verbindungen mit einem asymmetrischen Kohlenstoffatom, für inactive mit einem *C-Atom und inactive mit einem nicht asymmetrischen C-Atom:

1. Weinsäure activ: (COOH) — *CH(OH) — [*CH(OH) — (COOH)],
   Bernsteinsäure inactiv: (COOH) → CH_2 — (CH_2 — COOH),
   Erythrit inactiv: (CH_2OH) — *CH(OH) — [*CH(OH) — CH_2OH]

Kohlenstoffverbindungen, die ein oder zwei Kohlenstoffatome enthalten, sind inactiv, obwohl viele derselben asymmetrische Kohlenstoffatome enthalten, wie z. B. das Natriumnitroäthan, *CH.Na(NO_2)(CH_3).

Die folgende Zusammenstellung enthält nach Landolt für einige Verbindungen die verschiedenen Modificationen.

Activ		Inactiv	
Rechtsdrehend	Linksdrehend	Durch Verbindung d. Rechts- u. Links-Modification	In Folge anderen räumlichen Baues des Molecüls
Rechtsweinsäure	Linksweinsäure	Traubensäure	Mesoweinsäure
Aepfelsäure aus Rechtsweinsäure	Natürliche Aepfelsäure	Aepfelsäure aus Traubensäure	Aepfelsäure aus Bernsteinsäure

Geht man von drehenden Substanzen aus und stellt Derivate derselben dar, so können zwei Fälle eintreten: 1) Das Derivat enthält kein asymmetrisches Kohlenstoffatom, es ist inactiv. Active Weinsäure liefert inactive Bernsteinsäure. 2) Das Derivat enthält noch ein asymmetrisches Kohlenstoffatom, dann ist es meist activ, oft aber auch inactiv.

Lösungen von Salzen von drehenden Basen und nichtdrehenden Säuren und drehenden Säuren und nichtdrehenden Basen besitzen ein

Drehungsvermögen. Die molecularen Drehungsvermögen der Salze derselben drehenden Basis resp. Säure sind in concentrirten Lösungen sehr verschieden, ja oft entgegengesetzt. In sehr verdünnten Lösungen nähern sich die molecularen Drehungsvermögen aber mehr und mehr demselben Werthe. Aus der Dissociationstheorie erklären sich diese Erscheinungen in der Weise, dass in concentrirten Lösungen die Salze als solche vorhanden sind und das Drehungsvermögen des activen Bestandtheils durch den mit ihnen verbundenen nicht activen beeinflusst wird, dass dagegen in verdünnten Lösungen die activen und inactiven Bestandtheile als Ionen vollständig getrennt sind. In den verdünnten Lösungen der verschiedensten Salze desselben activen Bestandtheils würden dann stets dieselben activen Ionen die Drehung bedingen.

X. Spectrophotometrie.

Gebraucht wird: Das Glan'sche Photometer; Heliostat; Gaslampe; Absorptionstrog; Kupfervitriol; farbiges Glas auf Stativ; Dickenmesser.

Princip. Die unter „Photometrie" angegebenen Methoden zur Vergleichung der Helligkeit zweier Lichtquellen setzen voraus, dass beide Lichtquellen dieselbe Farbe haben. Ist dies nicht der Fall, oder will man die Stärke der Absorption einer Substanz für die verschiedenen Farben untersuchen, so muss man das zu untersuchende Licht und das Licht der Vergleichslampe in ein Spectrum zerlegen. Man halbirt dazu den Spalt eines Spectralapparates und beleuchtet jede Hälfte mit dem Lichte einer der zu vergleichenden Lichtquellen; man stellt z. B. vor die eine Hälfte ein Vergleichsprisma (S. 282), oder man lässt bei Absorptionsversuchen auf die beiden Spalthälften Licht fallen, das durch verschieden dicke Schichten der absorbirenden Substanz gegangen ist.

Um die Helligkeit in den auf diese Weise im Beobachtungsfernrohre über einander entstehenden Spectren zu vergleichen, ändert man die Gesammthelligkeit des einen der beiden Spectren in messbarer Weise, bis die Helligkeit der untersuchten Farbe gleich ist. Bei dem Vierordt'schen, von Krüss modificirten Photometer ändert man dazu die Weite der beiden Spalthälften, bei dem Glan'schen Photometer geschieht die Schwächung durch polarisirende Vorrichtungen [1]).

1. Glan'sches Photometer.

Apparat (Fig. 216 und 217, a. f. S.). Das Spectrophotometer besteht aus dem Collimatorfernrohre C mit dem Spalte A, dem Beobachtungsfernrohre F, dem Scalenrohre S und dem Glasprisma P.

Der Spalt des Collimators ist durch einen quer über demselben befestigten Streifen in eine obere und untere Hälfte getheilt. Die von diesen kommenden Strahlen werden durch die Collimatorlinse parallel gemacht und fallen auf ein Wollaston'sches Doppelprisma [2]) (W), das von jeder Spalthälfte ein ordentliches und ein ausserordentliches Strahlenbündel liefert, die verschieden stark abgelenkt und senkrecht zu ein-

[1]) Eine andere, praktische Form ist von G. Hüfner angegeben.

[2]) Dasselbe besteht aus zwei mit den Hypotenusenflächen zusammengekitteten rechtwinkligen Kalkspathprismen, in deren einem die Axe senkrecht zur brechenden Kante, in deren anderem die Axe parallel der brechenden Kante ist.

ander polarisirt sind. Die entstehenden vier Strahlenbündel fallen durch ein bei *G* befindliches drehbares Nicol, dessen Stellung an einem Theilkreise *K* abgelesen wird, auf das Prisma *P*, werden hier dispergirt und in dem Beobachtungsfernrohr *F* zu vier Spectren vereinigt. Liegen die Axen der Rohre *C* und *F* in einer horizontalen Ebene (was durch

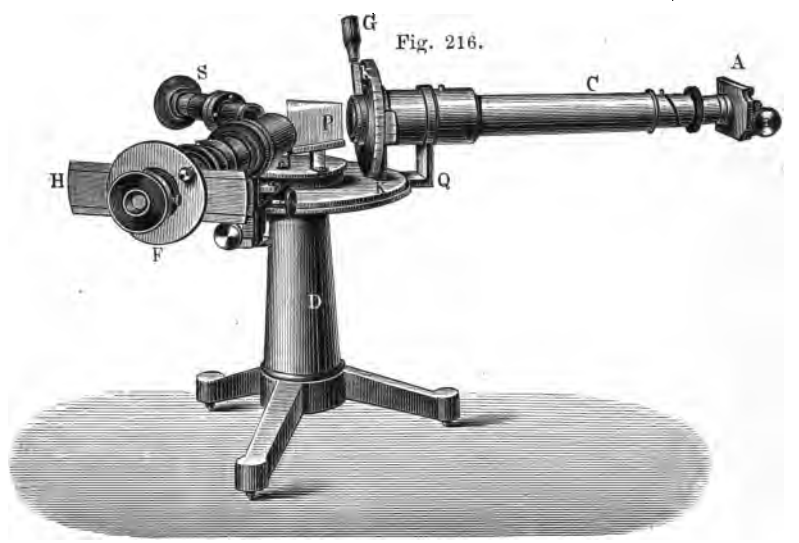
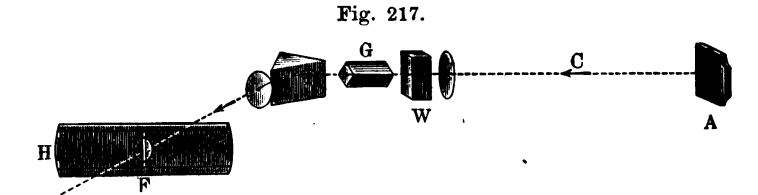


Fig. 216.

Drehen an den mit den Trägern derselben verbundenen Stellschrauben bewirkt wird), so fällt von der einen Spalthälfte das ausserordentliche, von der anderen das ordentliche Bild in den mittleren Theil des Gesichtsfeldes. Das darüber und darunter liegende dritte und vierte

Fig. 217.



Spectrum wird durch die Platte *H* abgeblendet, in der ein Ausschnitt angebracht ist, dessen Höhe nahe gleich derjenigen der beiden mittleren Spectra zusammen ist.

Das obere dieser beiden Spectra ist unten durch eine vom Roth zum Violett schwach absteigende, das untere oben durch eine vom Roth zum Violett schwach ansteigende Linie begrenzt. Berühren sich also das untere und obere Spectrum für irgend eine mittlere Farbe, was man durch Ausziehen des Collimators erreichen kann, so stehen die Spectra für die weniger brechbaren Strahlen etwas aus einander, für die brechbareren greifen sie über einander. Man kann in jedem Theile

des Spectrums eine Berührung herbeiführen, ohne die Schärfe der Einstellung zu beeinträchtigen, indem man gleichzeitig Collimatorfernrohr und Beobachtungsfernrohr verkürzt oder verlängert. In der in der Brennebene des Beobachtungsfernrohres F befindlichen Platte K lassen sich von beiden Seiten her zwei Schieber vorschieben, dadurch kann man irgend einen schmalen Theil des Spectrums ausblenden; der Raum zwischen den Schiebern heisst der Ocularspalt. Das Scalenrohr S dient zur Bestimmung der verschiedenen Stellen im Spectrum.

Dreht man das Nicol'sche Prisma bei G so, dass sein Hauptschnitt zu der Polarisationsebene des von der oberen Spalthälfte kommenden, durch das Wollaston'sche Prisma gegangenen Lichtbündels senkrecht steht, so erscheint das untere Spectrum dunkel, das obere hell. Dreht man von dieser Stellung aus das Nicol um α Grad, so ist die Helligkeit der unteren Hälfte $ia\sin^2\alpha$, die der oberen $i'a'\cos^2\alpha$, wo i und i' die Lichtmengen sind, welche auf die obere bezw. untere Spalthälfte fallen; a und a' sind constante Grössen, welche durch den Lichtverlust im Apparate bestimmt sind. Ist α der Winkel, bei dem beide Gesichtshälften in einem Spectralbezirke gleich hell sind, so ist für die betreffende Farbe

$$i\,a\sin^2\alpha = i'a'\cos^2\alpha$$

$$\frac{i}{i'} = \frac{a'}{a}\,ctg^2\alpha,\quad i = i'c\,.\,cotg^2\alpha.$$

1. Aichen des Apparates.

Uebung. 1) Man zeichnet für die Scala S des Apparates nach den S. 284 gegebenen Vorschriften die Wellenlängencurve.

2) Man richtet den Apparat gegen eine Milchglasplatte, hinter welche man eine Lampe stellt, so dass beide Spalthälften gleichmässig erleuchtet werden, also $i = i'$ und $i/i' = 1$ ist.

3) Man dreht das Nicol so, dass das untere Gesichtsfeld dunkel erscheint und liest die Lage desselben ab; sie sei α_0.

4) Man dreht, bis beide Gesichtshälften gleich erscheinen: Lage α_1. Dann ist

$$1 = c\,.\,ctg^2(\alpha_1 - \alpha_0),\quad c = tg^2(a_1 - \alpha_0).$$

2. Vergleichung der Helligkeit der verschiedenen Farben zweier Lichtquellen.

Uebung. 1) Man lässt das durch einen Heliostaten in horizontaler Richtung geworfene Sonnenlicht auf ein vor dem Vergleichsprisma des Apparates in passender Entfernung aufgestelltes weisses Papier fallen.

2) Vor den Spalt stellt man eine möglichst helle Gaslampe.

3) Man blendet, indem man das Beobachtungsfernrohr dreht, mit dem Ocularspalt an den den Scalentheilen $S_1, S_2 \ldots$, d. h. den Wellenlängen $\lambda_1, \lambda_2 \ldots$ entsprechenden Theilen des Spectrums schmale, gleich breite Streifen aus, und liest die Lagen $\alpha_1, \alpha_2 \ldots$ des Nicols ab, bei denen Gleichheit der beiden Bilder eintritt.

Dann giebt $c\,ctg^2(\alpha_1 - \alpha_0)$, $c\,ctg^2(\alpha_2 - \alpha_0)$ u. s. w. die relative Helligkeit des Lampenlichtes gegenüber dem diffus reflectirten Sonnenlicht für die Wellenlängen $\lambda_1, \lambda_2 \ldots$

Man findet, dass das Gaslicht relativ arm an violetten und blauen Strahlen ist, und dass in ihm die rothen Strahlen überwiegen.

3. Bestimmung der Extinction und Absorption[1]) eines farbigen Glases für die verschiedenen Theile des Spectrums.

Uebung. 1) Ein Stück blauen Glases wird mittelst eines Statives vor die obere Spalthälfte gehalten, so dass die untere Kante gerade vor der Mitte des den Spalt bedeckenden Streifens liegt. Man stellt vor das Glas eine Linse und in Brennweitenentfernung vor dieselbe eine Lampe; dann erscheinen im unteren Spectrum, welches der oberen Spalthälfte entspricht, im Gelb und Grün dunkle Absorptionsstreifen.

2) Man liest die den Streifen entsprechenden Scalentheile S ab und blendet einzeln ihre mittelsten, dunkelsten Stellen, ihre Randpartien, sowie auch diejenigen Stellen aus, in denen keine Absorption zu sehen ist.

3) Man bestimmt für die einzelnen Streifen die Winkel α, für welche Gleichheit eintritt. Dann ist das Verhältniss der Helligkeit des durchgegangenen Lichtes i_d zu derjenigen des auffallenden i_a, d. h. die Exstinction E:

$$E = i_d/i_a = c\,ctg^2\,(\alpha - \alpha_0).$$

Die Absorption des Glases für die betreffende Strahlengattung ist:

$$(i_a - i_d)/i_a = A.$$

Der Helligkeitsverlust $i_a - i_d$ rührt nicht allein von der Absorption im Glase her, sondern auch von der Reflexion an der vorderen und der hinteren Wand desselben; bei jeder Reflexion an der Grenze von Luft und Glas beträgt bei Glas von dem Brechungsindex 1,5 der Verlust $0{,}04\,i_a$, beide Verluste zusammen betragen also $0{,}08\,i_a$. Diese sind von dem beobachteten Helligkeitsverlust abzuziehen.

4. Bestimmung der Extinctions- und Absorptionscoëfficienten einer gefärbten Flüssigkeit.

Hierzu dient ein Glastrog mit parallelen Wänden, Fig. 218, in dessen untere Hälfte eine kleine planparallele Platte (Schulz'scher Körper S) gelegt wird, so dass zwei über einander liegende, verschieden dicke Tröge entstehen.

Uebung. 1) Man füllt den Trog mit Kupfersulfatlösung und stellt ihn so vor den Spalt, dass die obere Kante des Schulz'schen Körpers vor der Mitte des Spaltes steht. Vor diesem stellt man eine Lampe auf und eine Linse, welche die von ihr ausgehenden Strahlen parallel macht.

2) Man bestimmt wie in 1) für verschiedene Stellen des Spectrums

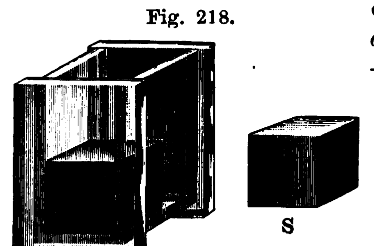
[1]) Ueber die Definitionen vergl. S. 224.

das Verhältniss i/i' der Intensitäten i und i' der durch die obere und die untere Hälfte des Troges gegangenen Strahlen.

3) Man misst die Dicke des Schulz'schen Körpers d mm und die lichte Dicke des ganzen Troges, also ohne Deckplatten D mm.

Berechnung. Ist I die Intensität des auffallenden Lichtes, $\varepsilon = e^{-\alpha}$ der auf die Schichtdicke $= 1$ mm bezogene Extinctionscoëfficient (S. 224), so sind die Intensitäten i und i' der durch die obere und untere Schicht von der Dicke d_1 und d_2, d. h. $d_1 = D$ und $d_2 = D - d$ gegangenen Strahlen:

Fig. 218.



$$i = Ie^{-\alpha D}, \quad i' = Ie^{-\alpha(D-d)}$$

$$i/i' = e^{-\alpha d} \text{ und}$$

$$\alpha = -\frac{1}{d} \frac{Log\ i/i'}{Log\ e},$$

α ist positiv, da $Log\ i/i' < 0$ ist.

Bemerkung. Dadurch, dass man zwei verschieden dicke Schichten derselben Lösung mit einander vergleicht, macht man sich fast frei von dem Einfluss der Lichtverluste, welche bei der Reflexion an den Glaswänden der Tröge und den Grenzflächen zwischen Glas und Lösung eintreten. Dass in der Schicht, in der sich der Schulz'sche Körper befindet, noch zwei Reflexionen an Glas und Flüssigkeit mehr stattfinden, hat nur einen kleinen Einfluss auf das Resultat.

2. Vierordt'sches Photometer.

Das Vierordt'sche Photometer ist ein Spectralapparat, dessen Spalt in zwei Hälften getheilt ist, welche mikrometrisch durch je eine Schraube verengt oder verbreitert werden können. Dabei verschieben sich die Backen einer jeden Spalthälfte symmetrisch zur Mitte des Spaltes, so dass die Lage der letzteren ungeändert bleibt.

Bei den Messungen erweitert man die Spalthälfte, vor der die schwächere Lichtquelle steht, bis beide Spectren gleich hell erscheinen. Sind dann b_1 und b_2 die Breiten der Spalthälften, i' und i'' die Intensitäten der auf sie auftreffenden Lichtstrahlen, so ist

$$i'/i'' = b_2/b_1.$$

Bestimmungen von Absorptionscoëfficienten gestalten sich wie S. 324.

D. Elektricität.

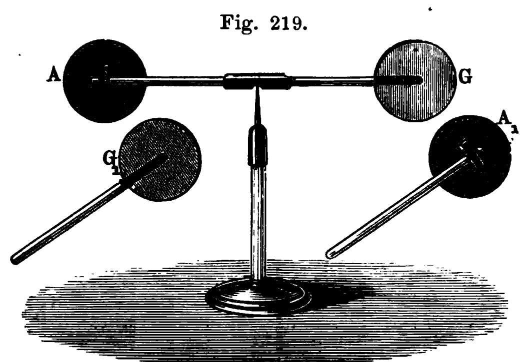
I. Elektrostatische Grundversuche.

Gebraucht wird: Apparat nach G. Wiedemann zur Erzeugung von Elektricität durch Reibung (Fig. 219); Goldblattelektroskop; Metalldraht; Siegellackstange; wollener Lappen; Glasstab; Schwefelstück; Apparat nach Ed. Hagenbach (Fig. 220); Hollundermarkkugel an Seidenfaden; Metallkugel; zwei hohle Halbkugeln, die sich um dieselbe Kugel gerade herumlegen, an isolirenden Holzgriffen.

1. Erzeugung von Reibungselektricität und Verhalten derselben.

Apparat. Auf einer Spitze schwebt in einer Metallhülse ein Glasstab I, der an seinem einen Ende eine mit Leder bedeckte Holzplatte A trägt, welche mit einem mit Kienmayer'schem Amalgam bestrichenen Stück Waschleder überzogen ist. An seinem anderen Ende trägt der Stab eine Glasplatte G. Auf dieselbe Spitze kann man einen anderen Stab II setzen, mit einer Hartgummiplatte H und einer mit Katzenfell K überzogenen Holzplatte. An kürzeren Glasstäben sind befestigt: eine Glasplatte G_1, eine Amalgamplatte A_1, eine Katzenfellplatte K_1 und eine Hartgummiplatte H_1.

Fig. 219.



Uebung 1. 1) Man verwendet den Stab I und reibt die Glasplatte G mit der Amalgamplatte A_1 und die Amalgamplatte A mit der Glasplatte G_1 und setzt den Stab I auf die Spitze.

Man nähert 1) A_1 an A und findet Abstossung, 2) G_1 an A: Anziehung, 3) G_1 an G: Abstossung, 4) A_1 an G: Anziehung.

2) Man verwendet den Stab *II*. Man reibt die Hartgummiplatte H mit der Katzenfellplatte K_1 und die Katzenfellplatte K mit der Hartgummiplatte H_1, und setzt den Stab auf die Spitze.

Man nähert H_1 an H: Abstossung, H_1 an K: Anziehung, K_1 an K: Abstossung, K_1 an H: Anziehung.

Die auftretenden Bewegungserscheinungen führt man darauf zurück, dass durch die Berührung (Reibung) in den Körpern bestimmte Veränderungen vor sich gegangen sind, dass sie „elektrisch" geworden sind.

Aus den Versuchen folgt, da jedenfalls durch Reibung von Gleichem an Gleichem Gleiches erzeugt wird:

Gleichartige oder gleichnamige Elektricitäten stossen sich ab, ungleichartige oder ungleichnamige ziehen sich an.

3) Man setzt auf die Spitze den Glasstab mit den Platten K und H; man reibt K und H_1, K_1 und H, ferner G_1 und A_1; G_1 stösst K ab und zieht H_1 an, A_1 stösst H ab und zieht K an.

4) Man reibt eine Siegellackstange S mit einem wollenen, an einem Glasstabe befestigten Lappen L, man nähert S der Glasplatte am Stabe *I*, sie wird angezogen, man nähert S der Amalgamplatte, sie wird abgestossen, L verhält sich umgekehrt.

Danach sind gleichnamig unter sich die bei obigen Versuchen erzeugten Elektricitäten von: Katzenfell, wollenem Lappen, Glas einerseits, ferner Hartgummi, Siegellack, Amalgam andererseits. Man nennt die durch Reibung von Glas entwickelte Elektricität Glas- oder positive Elektricität, die durch Reibung von Harz (Hartgummi, Siegellack) entwickelte Harz- oder negative Elektricität. Wir haben also in den obigen Fällen durch Reibung erzeugt im Glas $+E$, im Amalgam $-E$, im Katzenfell $+E$, im Hartgummi $-E$, im Wollenlappen $+E$, im Siegellack $-E$.

5) Man berührt den Knopf eines Goldblattelektroskopes mit einem elektrisirten Körper: die Goldblättchen divergiren. Die Elektricität wird von dem elektrisirten Körper auf das Elektroskop übertragen, sie verbreitet sich auf die Goldblättchen, diese laden sich gleichnamig und stossen sich ab.

Bei gleich starker Ladung stossen sie sich stets gleich stark ab.

2. Leiter und Nichtleiter.

Uebung 2. 1) Man berührt das geladene Elektroskop mit einem Metallstabe oder einer nassen Schnur: die Divergenz hört auf. Diese Körper leiten die Elektricität ab, sie heissen Leiter.

2) Man berührt das geladene Elektroskop mit einem Glasstabe, mit einer Siegellackstange, einem Schwefelstück: die Divergenz bleibt bestehen. Diese Körper heissen Nichtleiter, Isolatoren, Dielektrica.

3. Positive und negative Elektricität.

Uebung 3. 1) Man nimmt zwei gleiche Elektroskope P_1 und P_2 und berührt P_1 mit einer von zwei entgegengesetzt geladenen Platten, etwa der Amalgamplatte: die Goldblättchen divergiren; man berührt P_2 mit der anderen der zwei Platten, etwa der Amalgamplatte, so lange, bis die Divergenz die gleiche ist.

2) Man bringt die Knöpfe von P_1 und P_2 zur Berührung: die Goldblättchen fallen zusammen, die Elektricitäten gleichen sich aus, neutralisiren sich.

3) Man wiederholt den Versuch mit einer Glasplatte und einer Siegellackstange u. s. f.

4) Man wiederholt den Versuch mit Vertauschung der Elektroskope P_1 und P_2.

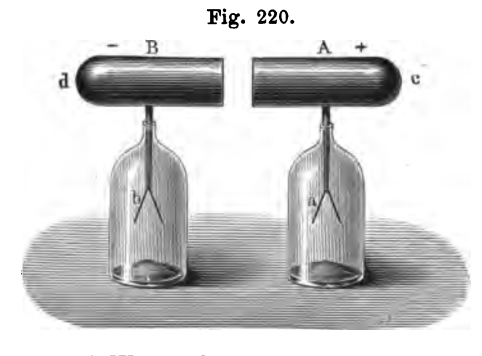
Bemerkung. Ungleichnamige Elektricitäten in solchen Mengen zusammengebracht, dass sie gleiche abstossende Wirkungen ausüben, neutralisiren sich.

Bei jeder Reibung werden also die beiden Arten Elektricität, positive und negative, geschieden, und zwar in gleicher Menge; Franklin nahm an, dass dieselben in den ungeladenen Körpern in gleichen Mengen enthalten sind und bei der Elektrisirung nur getrennt werden.

4. Erzeugung von Elektricität durch Influenz.

Uebung 4. 1) Zwei Messingcylinder A und B, die an einem Ende abgerundet, am anderen Ende durch eine ebene Fläche begrenzt sind und die den oberen Theil von zwei Goldblattelektroskopen bilden, bringt man mit ihren ebenen Enden zur Berührung. Man hält einen durch Reiben mit Kienmayer'schem Amalgam positiv elektrisirten Glasstab vor d, die Goldblättchen bei a und b divergiren; Elektricität ist durch Influenz erzeugt worden.

Fig. 220.



2) Während der Glasstab an seiner Stelle steht, nimmt man erst B fort, dann A.

3) Man nähert B einer an einem Seidenfaden aufgehängten, mit einer geriebenen Siegellackstange elektrisirten Hollundermarkkugel H: sie wird abgestossen, B ist negativ.

4) Man nähert A der Kugel H: sie wird angezogen, A ist positiv.

5) Man berührt A mit B, die Blättchen a und b fallen zusammen, das ganze System wird unelektrisch.

Durch die Annäherung des Glasstabes sind in AB die beiden Elektricitäten in gleichen Mengen durch Influenz geschieden und vollkommen getrennt worden.

5. Die Elektricität befindet sich nur an der Oberfläche der Leiter.

Apparat. Um eine Metallkugel auf isolirtem Stativ können zwei von isolirten Handhaben gehaltene hohle Halbkugeln aus Metall gelegt werden.

Uebung 5. 1) Man ladet die Metallkugel und berührt mit ihr ein Elektroskop, die Goldblättchen divergiren.

2) Man entladet das Elektroskop, legt um die Kugel die Halbkugeln, entfernt die Halbkugeln, berührt mit ihnen das Elektroskop: die Blättchen divergiren, die Halbkugeln sind elektrisch.

3) Man entladet das Elektroskop und berührt es mit der Metallkugel, das Elektroskop divergirt nicht, die Kugel selbst ist jetzt unelektrisch.

Bemerkung. Die Elektricität befindet sich also nur an der Oberfläche der Leiter. Hieraus kann man mit grösserer Sicherheit, als directe Messungen dies ermöglichen würden, folgern, dass sich gleichnamige Elektricitäten umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung abstossen, vgl. S. 1.

IIa. Galvanismus.

(Einleitung und Apparate.)

1. Ohm'sches Gesetz.

Bei einem galvanischen Strome hat man zu unterscheiden 1) die Stromstärke I, 2) die elektromotorische Kraft E, und 3) den Widerstand W; Grössen, die sämmtlich in Einheiten ihrer Art gemessen werden.

1) Die Stärke oder Intensität eines Stromes I giebt die Elektricitätsmenge an, welche in der Zeiteinheit durch den ganzen Querschnitt eines Leiters fliesst. Die Stromdichte Δ ist die in der Zeiteinheit durch die Einheit des Querschnittes fliessende Elektricitätsmenge [1]). Fliesst also durch einen Leiter von dem Querschnitte Q ein Strom von der Intensität I, so ist die Stromdichte desselben $\Delta = I/Q$.

2) Die elektromotorische Kraft [2]) E einer Kette ist gleich dem Potential- oder Spannungsunterschiede an ihren Polen im stromlosen Zustande.

3) Der Widerstand W der einzelnen Theile der Leitung entspricht der in ihnen in Wärme umgesetzten Energie.

Diese drei Grössen sind verknüpft durch das Ohm'sche Gesetz:

$$I = a\,\frac{E}{W}.$$

Die Stromstärke oder Intensität ist direct proportional der gesammten elektromotorischen Kraft, umgekehrt proportional dem gesammten Widerstande.

Bei passender Wahl der Einheiten für I, E, W wird $a = 1$, also:

$$I = \frac{E}{W},$$

dies ist z. B. der Fall, wenn man die Intensität in Ampère, die elektromotorische Kraft in Volt, die Widerstände in Ohm misst.

---

[1]) Die Betrachtung der Stromdichte spielt bei den Vorgängen der Elektrolyse eine grosse Rolle.

[2]) Man kürzt elektromotorische Kraft vielfach ab mit E. M. K.

Die gesammte elektromotorische Kraft E ist gleich der Summe aller im Stromkreise vorhandenen elektromotorischen Kräfte.

Im unverzweigten Kreise ist der gesammte Widerstand W gleich der Summe aller Widerstände w der einzelnen auf einander folgenden Theile der Leitung, also

$$W = w_1 + w_2 + \cdots$$

Der Widerstand w eines cylindrischen Leiters ist proportional seiner Länge l, umgekehrt proportional seinem Querschnitte q, also

$$w = \varepsilon . l / q.$$

Die Grösse ε ist eine für jede Substanz charakteristische Zahl, nämlich der Widerstand der Längeneinheit (in Metern) für einen Quadratmillimeter Querschnitt, gemessen in der bestimmten Einheit (Ohm); ε heisst der specifische Widerstand. Der reciproke Werth des Widerstandes $1/w$ ist die Leitfähigkeit. $\Lambda = 1/\varepsilon$ heisst die specifische Leitfähigkeit.

Nicht nur für den ganzen Stromkreis gilt diese Beziehung zwischen Intensität, elektromotorischer Kraft (Potentialunterschied) und Widerstand, sondern auch für jeden Theil desselben. Ist etwa der Potentialunterschied an den Enden eines Drahtes e Volt ($e\,V$), der Widerstand des Drahtes w Ohm ($w\,\Omega$), so ist die Stromstärke i Ampère ($i\,A$) (s. S. 352):

$$i = \frac{e}{w}.$$

Im C.-G.-S.-System (S. 5) definirt man: Der specifische Widerstand ist derjenige zwischen zwei gegenüberliegenden Seiten eines Würfels, dessen Kanten 1 cm lang sind, und der diesen Kanten parallel vom Strome durchflossen wird.

Bei sehr grossen specifischen Widerständen, wie sie z. B. bei Elektrolyten vorkommen, bezieht man sie auf den des Quecksilbers $= 10^8$. Ist in diesem Maasse ein Widerstand $= 1$, so ist er 10^8mal grösser, als der des Quecksilbers.

Häufig theilt man den Widerstand W in einem Stromkreise in zwei Theile: 1) den Widerstand in dem Elemente oder den Elementen (der Säule): den inneren Widerstand w_i, und 2) den Widerstand in dem Schliessungskreise: den äusseren Widerstand w_a [1]). Dann ist

$$W = w_i + w_a.$$

Ist die Strombahn nicht ein einfacher Draht, sondern theilt sie sich an der einen oder anderen Stelle in mehrere sich nachher wieder vereinigende Zweige, so haben wir es mit einer Stromverzweigung zu

---

1) Derselbe Unterschied wird auch bei Dynamomaschinen etc. gemacht.

thun [1]). Punkte, in denen mehr als zwei Leiter zusammenstossen, heissen Verzweigungspunkte. Für verzweigte Ströme gelten die folgenden Ohm-Kirchhoff'schen Sätze:

1) Zu jedem Verzweigungspunkte fliesst ebensoviel Elektricität hin, wie von ihm fortfliesst.

In der Fig. 221 ist also $i_1 + i_3 + i_5 = i_2 + i_4$.

An jedem Verzweigungspunkte ist also die Summe der Stromstärke gleich Null, wenn man den abfliessenden Strömen das entgegengesetzte Vorzeichen giebt wie den ankommenden.

2) Rechnet man in einem beliebigen, in sich geschlossenen Theil der Leitung die darin vorkommenden elektromotorischen Kräfte und Stromstärken in der einen Richtung

Fig. 221.

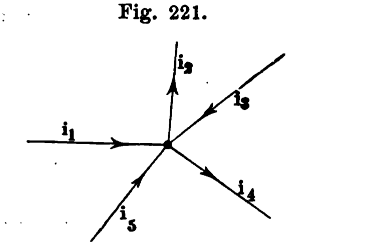
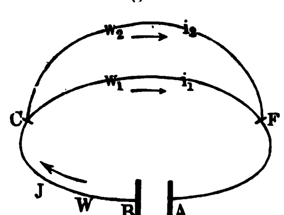


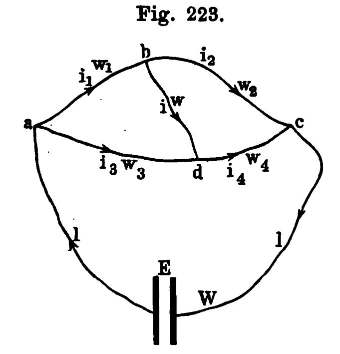
Fig. 222.



positiv, in der anderen negativ, so ist die Summe der Producte aus den einzelnen Widerständen in die zugehörigen Stromstärken gleich der Summe der elektromotorischen Kräfte.

1) In Fig. 222 haben wir, da in dem Kreise $Cw_2i_2Fi_1w_1i$ keine elektromotorische Kraft vorhanden ist, wenn wir mit w_1 und w_2 die Widerstände der beiden Strombahnen zwischen C und F, mit i_1 und i_2 die Intensitäten der Ströme in ihnen bezeichnen:

Fig. 223.



$$J = i_1 + i_2 \quad \text{und} \quad i_1 w_1 - i_2 w_2 = 0,$$

$$i_1 : i_2 = w_2 : w_1 \quad \text{und} \quad i_1 w_1 = i_2 w_2.$$

$$i_1 = \frac{J w_2}{w_1 + w_2}, \quad i_2 = \frac{J w_1}{w_1 + w_2}.$$

Für Stromzweige, die von einem Punkte ausgehen und sich in einem zweiten wieder vereinigen, gilt also der Satz:

Die Intensitäten der Zweigströme verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände der Zweige.

---

[1]) Auch wenn die Stromleiter dickere Drähte oder Platten sind, verzweigen sich in denselben die Ströme; die Stromdichte ist im Allgemeinen nicht an allen Stellen eines Querschnittes die gleiche.

Schaltet man neben irgend einen Strom 1 einen Zweig 2, so nennt man diesen einen Nebenschluss; die Intensität des Stromes in demselben kann durch Vergrössern seines Widerstandes beliebig klein gemacht werden.

Ist z. B. $w_1 = 9\,w_2$, so ist $i_1 = Jw_2/10\,w_2 = {}^1/_{10}\,J$, durch w_1 fliesst nur ${}^1/_{10}$ des Gesammtstromes. Ist $w_1 = 99\,w_2$ resp. $w_1 = 999\,w_2$, so fliesst durch w_1 resp. ${}^1/_{100}$, ${}^1/_{1000}$ des gesammten Stromes (vergl. S. 365). Der Gesammtwiderstand w der beiden Zweige w_1 und w_2 zusammen ist:

$$w = w_1 \,.\, w_2/(w_1 + w_2).$$

Würden von dem Punkte C drei Zweige mit den Widerständen $w_1 w_2 w_3$ nach dem Punkte F gehen, so würde der Gesammtwiderstand der drei Zweige sein:

$$w = \frac{w_1 w_2 w_3}{w_1 w_2 + w_1 w_3 + w_2 w_3}.$$

2) Verbindet man, Fig. 223, die beiden Zweige, in die sich ein Strom theilt, *abc* und *adc* durch einen Querdraht *bd*, eine sogenannte Brücke, so erhält man die Wheatstone'sche Drahtcombination (vergl. S. 350). Nach den Kirchhoff'schen Sätzen ist für die beiden Kreise *abd* und *bcd*

$$i_1 w_1 + iw - i_3 w_3 = 0, \qquad i_2 w_2 - i_4 w_4 - iw = 0,$$
$$i_1 - i - i_2 = 0, \qquad i_2 + i - i_4 = 0.$$

Ist $i = 0$, d. h. fliesst durch den Draht *bd* kein Strom, so ist $i_1 = i_2$, $i_3 = i_4$ und: 1) $i_1 w_1 = i_3 w_3$, 2) $i_2 w_2 = i_4 w_4$, also durch Division von 1) und 2)

$$w_1 : w_2 = w_3 : w_4.$$

2. Einheiten.

Früher wurden für die Messung der Stromstärke, der elektromotorischen Kraft und des Widerstandes empirische Einheiten benutzt, von denen wir nur diejenige des Widerstandes erwähnen.

Einheit des Widerstandes war der Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt bei 0°, die sogenannte Siemens-Einheit.

Bei Einführung der willkürlichen Einheiten wird a in der Gleichung für das Ohm'sche Gesetz nicht $= 1$. Bei dem sogenannten absoluten elektromagnetischen Maasssystem ist $a = 1$.

Die absoluten Einheiten definiren wir hier nicht; von ihnen leiten sich die folgenden praktischen Einheiten ab; auch bei ihrer Einführung wird $a = 1$.

Einheit der Stromstärke ist das Ampère (A). Der Strom 1 Ampère zersetzt oder scheidet aus:

	mgr Wasser	mgr Silber	mgr Kupfer	cbcm Knallgas von 0° und 760 mm	cbcm Wasserstoff[1])
in 1 Sec.	0,0933	1,118	0,3284	0,1740	0,1160
„ 1 Min.	5,60	67,01	19,70	10,44	6,96
„ 1 Stde.	336	4026	1182	626	417

Einheit des Widerstandes ist das Ohm (Ω) = 1,063 Siemens.

Einheit der elektromotorischen Kraft ist das Volt (V), d. h. diejenige elektromotorische Kraft, welche in einem Schliessungskreise von 1 Ohm Widerstand einen Strom von 1 Ampère erzeugt, also

$$1 \text{ Volt} = 1 \text{ Ampère} \times 1 \text{ Ohm}.$$

Ein Daniell (D.)- und ein Latimer Clark (L. C.)-Element (siehe weiter unten S. 353 und 354) haben, wenn t die Temperatur bedeutet, folgende elektromotorische Kräfte:

$$1 \text{ D.} = 1{,}08 \text{ bis } 1{,}12 \text{ Volt}, \quad 1 \text{ L. C.} = [1{,}433 - 0{,}00082\,(t - 15)] \text{ Volt}.$$

3. Apparate.

1. Galvanische Elemente.

Die galvanischen Elemente, die Stromerzeuger, bestehen aus zwei Leitern erster Classe, Metallen, Kohle, Braunstein, Bleisuperoxyd, die entweder beide in dieselbe Flüssigkeit, oder in verschiedene Flüssigkeiten tauchen. Diese sind entweder durch eine poröse Thonwand, ein Stück Pergamentpapier oder Blase, durch welche nur eine sehr langsame Diffusion vor sich geht, getrennt oder so über einander geschichtet, dass die specifisch schwerere Flüssigkeit unten, die leichtere sich oben befindet.

Man bezeichnet ein galvanisches Element durch die chemischen Zeichen der in ihm enthaltenen Substanzen, die durch verticale Linien von einander getrennt sind; der zuerst stehende Leiter erster Classe ist der positive Pol des Elementes. Das Platin in concentrirter Salpetersäure, Zink in verdünnter Schwefelsäure enthaltende Grove'sche Element wird also geschrieben:

$$Pt \mid HNO_3 \mid H_2SO_4\,aq \mid Zn.$$

Elemente mit einer Flüssigkeit sind bequemer zu handhaben, aber nicht constant, d. h. es verändert sich mit der Zeit ihre elektromotorische Kraft (s. w. u.).

---

[1]) 1 cbcm H_2 wiegt 0,0895 mgr.

1. Elemente mit einer Flüssigkeit.

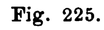
1) Volta'sche Kette. Amalgamirte Zinkplatten und Kupferplatten tauchen in verdünnte Schwefelsäure (1 Thl. concentrirte Säure auf 10 bis 12 Thle. Wasser) (Kupfer + Pol, Zink — Pol).

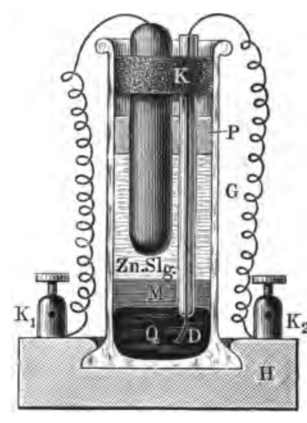
2) Leclanché-Element. In einem Glase befindet sich ein Cylinder aus Braunstein und Gaskohle mit einer Klemmschraube und ein amalgamirter Zinkstab. Das Glas ist mit concentrirter Salmiaklösung gefüllt (Kohle-Braunstein + Pol, Zink — Pol). Die elektromotorische Kraft (E. M. K.) ist (stromlos) etwa 1,3 Volt.

3) Bunsen's Chromsäureelement. Tauchelement. Fig. 224. In einem Glase befindet sich eine Chromsäure enthaltende Lösung, in die eine Zinkplatte Z und zwei Kohlenplatten K tauchen; beide sind mit Klemmschrauben verbunden. Die Zinkplatte wird an dem Stabe a aus der Flüssigkeit gehoben, sobald das Element nicht gebraucht wird

Fig. 224.




Fig. 225.



(Kohle + Pol, Zink — Pol). — Die Lösung erhält man, wenn man 50 gr krystallisirte Chromsäure in 1 Liter Wasser löst, und zu der Lösung langsam 50 cbcm concentrirte Schwefelsäure setzt. E. M. K. = ca. 2 Volt (bei schwachem Strome).

4) Element von Latimer Clark (Fig. 225). Ein 2 cm weites und 6 cm hohes Cylinderglas G wird in einen Holzfuss H mit zwei Klemmschrauben K_1 und K_2 eingesetzt. In das Glas kommt reines Quecksilber (Q), darauf mit Zinksulfatlösung angefeuchtetes Mercurosulfat (M), und darauf ein Brei von Zinksulfatkrystallen ($ZnSO_4$) mit gesättigter Zinksulfatlösung. In den Brei steckt man einen amalgamirten Zinkstab Z, der in einem paraffinirten Kork K befestigt ist, den Kork übergiesst man mit einem Gemenge von Wachs und Harz. Von dem Zinkstabe führt ein Kupferdraht zu der Klemmschraube K_1. Ein durch ein Glasrohr bis auf seine Spitze isolirter Platindraht D führt zu dem Quecksilber und ist mit der anderen Klemmschraube K_2 ver-

bunden. Dem Mercurosulfat wird beim Verreiben mit dem Zinksulfat etwas Quecksilber zugesetzt, um etwa vorhandenes Mercurisulfat zu reduciren. Der obere Theil des Glases muss rein bleiben, damit kein Auskriechen des Zinksulfates eintritt. Einige Tropfen Paraffinöl *P*, die man auf die Zinksulfatlösung giesst, verhindern ein Verdunsten derselben. Die Werthe der E. M. K. giebt die Formel S. 352.

5) Zu den Elementen mit einer Flüssigkeit gehören auch die Accumulatoren. Sie bestehen aus zwei Bleiplatten, deren eine mit Mennige bedeckt ist, und die in verdünnter Schwefelsäure stehen. Durch einen hindurchgeleiteten Strom werden sie „polarisirt", wobei

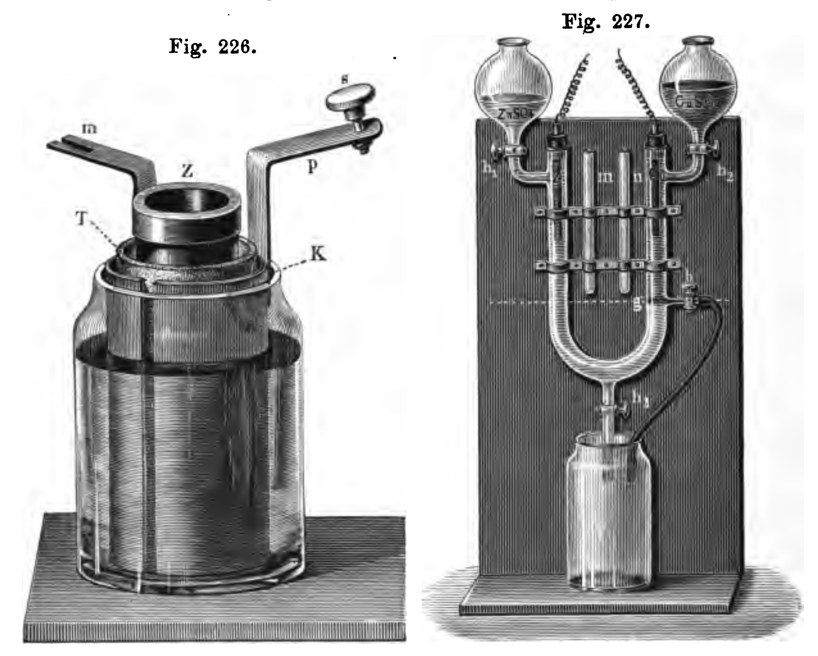


Fig. 226. Fig. 227.

auf der einen Platte metallisches Blei, auf der anderen Bleisuperoxyd entsteht. Schliesst man die Elemente nach Ausschaltung des hindurchgeleiteten Stromes, so erhält man einen Polarisationsstrom.

2. Elemente mit zwei Flüssigkeiten.

1) Element von Daniell (Fig. 226). Man setzt einen Cylinder *K* aus dünnem Kupferblech in ein Glas mit concentrirter Kupfervitriollösung, stellt in dasselbe einen Thoncylinder mit Zinkvitriollösung oder verdünnter Schwefelsäure und in diese den amalgamirten Zinkcylinder *Z* (Kupfer + Pol [*p*], Zink — Pol [*m*]).

Das Fleming'sche Normal-Daniell (Fig. 227) besteht aus einem U-förmig gebogenen Rohre, dessen linker und unterer Theil bis *g* mit Zinksulfatlösung vom specifischen Gewichte 1,2 (bei 20°), dessen

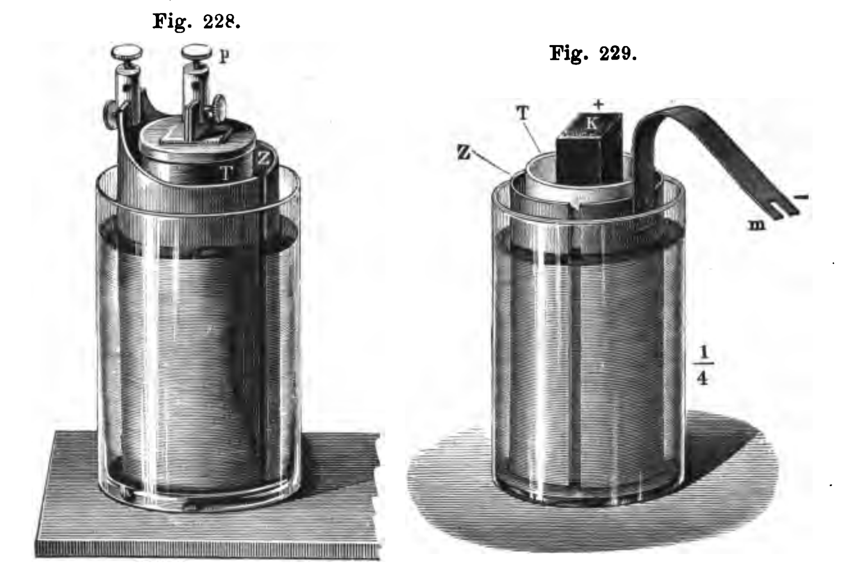
rechter Schenkel mit Kupfersulfatlösung vom specifischen Gewichte 1,1 (bei 20°) gefüllt wird. Durch Ablassen bei *b* kann man eine vollkommen scharfe Trennung der beiden Flüssigkeitssäulen herbeiführen. Mit einem (nicht amalgamirten) Zinkstabe links, einem Kupferstabe rechts versehen, giebt das Element 1,072 Volt bei 20°.

2) und 3) Elemente von Grove und Bunsen. Dieselben bestehen aus Zink in verdünnter Schwefelsäure und Platin (Grove) oder Kohle (Bunsen) in concentrirter Salpetersäure. Eine Form des Grove'schen Elementes giebt Fig. 228. *Z* ist der Zinkcylinder, *T* der Thoncylinder, *p* die mit dem Platinblech verbundene Klemmschraube.

Eine Form des Bunsen'schen Elementes giebt Fig. 229. *Z* ist der Zinkcylinder, *T* die Thonzelle, *K* das Kohlenprisma. Bei anderen

Fig. 228.

Fig. 229.



Formen ist die Kohle und die Salpetersäure ausserhalb der Thonzelle, das Zink steht innerhalb derselben in verdünnter Schwefelsäure. E.-M.-K. = ca. 2,1 Volts.

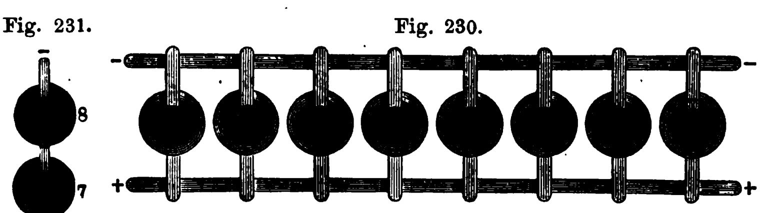
Bei den Bunsen'schen und Grove'schen Elementen ist Folgendes zu beachten: Die Schwefelsäure enthält 1 Vol. englische Schwefelsäure auf ca. 20 Vol. Wasser. Man giesst die Schwefelsäure unter stetem Umrühren mit einem Glasstabe in die entsprechende Menge Wasser. Das Gemisch wird dabei heiss, man lässt es erkalten, ehe man es in die Gefässe einfüllt. Die Salpetersäure soll bei dichteren Strömen ein specif. Gew. 1,3 bis 1,4 haben. Während des Gebrauches wird sie verdünnter, sie muss daher von Zeit zu Zeit erneuert werden.

Man giesst erst die Schwefelsäure in das Element, damit die Thonzelle mit derselben durchtränkt wird, und möglichst wenig von der

Salpetersäure zum Zink dringt. Die Schwefelsäure muss etwa um $^1/_8$ höher als die Salpetersäure stehen. Man muss sich sorgfältigst hüten, Salpetersäure zum Zink zu giessen, da sich sonst schädliche Dämpfe von Untersalpetersäure entwickeln. Dieselben bilden sich stets, während das Element geschlossen ist. Die Elemente müssen daher im Freien oder in einem mit einem Abzuge versehenen Raume stehen. Nach dem Gebrauche nimmt man die Elemente aus einander. Die Thonzellen und Kohlen stellt man nach Abspülen mit viel Wasser längere Zeit in

Fig. 231.

Fig. 230.



besonderen Gefässen ganz unter Wasser, damit alle Säure, sowie die gebildeten Salze aus denselben ausgewaschen werden.

Prüft man mittelst eines sehr empfindlichen Elektroskops die Ladung eines mit dem Zinkpol der obigen Elemente verbundenen Metalles, so ist dieselbe negativ, die eines mit dem anderen Pol verbundenen Metalles ist positiv; der Strom geht also ausserhalb des Elementes von **Kupfer**, **Kohle**, **Quecksilber**, **Platin** zum **Zink**, d. h. in der Richtung des Alphabetes.

3. Verbindung mehrerer Elemente.

Mehrere n-Elemente von der elektromotorischen Kraft E und dem Widerstande W kann man in verschiedener Weise verbinden (schalten).

1) Neben einander (Fig. 230): Man verbindet die positiven (Kohle-) Pole aller Elemente und die negativen (Zink-) Pole aller Elemente mit einander. **Man** hat dann ein Element von derselben elektromotorischen Kraft E, wie sie ein einzelnes der Elemente besitzt, aber von einem der Zahl der Elemente n entsprechend grösseren Querschnitt, also entsprechend kleinerem Widerstande (W/n) (vergl. Ohm'sches Gesetz).

2) Hinter einander (Fig. 231): Man verbindet den positiven Pol des ersten Elementes mit dem negativen Pol des zweiten und so fort. Man hat dann die n-fache elektromotorische Kraft (nE), aber auch den n-fachen Widerstand ($n\,W$).

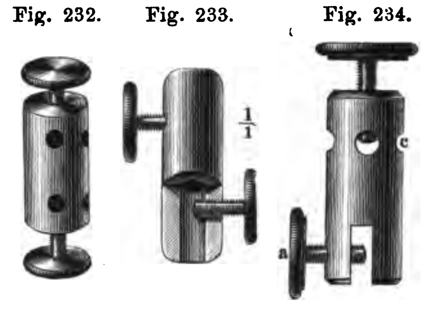
Man kann auch z. B. die acht Elemente gruppenweise etwa zu je zweien hinter einander und dann alle vier Gruppen neben einander schalten.

Bei einer gegebenen Anzahl von Elementen verbindet man dieselben so, dass ihr innerer Widerstand möglichst gleich dem Widerstande im äusseren Schliessungskreise ist; bei grossen äusseren Widerständen schaltet man die Elemente also hinter einander, bei kleinen neben einander.

2. Leitungsdrähte und Klemmschrauben.

Die Leitungsdrähte bestehen aus Kupfer. Für schwache Ströme nimmt man dünne, für starke Ströme dicke Drähte, da sich erstere sonst durch den Strom zu stark erwärmen. 1 qmm Querschnitt kann man ungefähr mit 4 Ampère dauernd belasten. Um eine metallische Berührung der Leitungsdrähte unter sich oder mit anderen Körpern zu verhindern, giebt man ihnen einen nicht leitenden Ueberzug von Seide, Baumwolle, Kautschuk oder Guttapercha. Zur Verbindung der Leitungsdrähte mit den Metallplatten der Säule oder unter einander können Quecksilbernäpfe dienen, in welche man die amalgamirten Enden der Drähte eintaucht. Weiter benutzt man zur Verbindung Klemmschrauben (Fig. 232 bis 234).

Fig. 232. Fig. 233. Fig. 234.

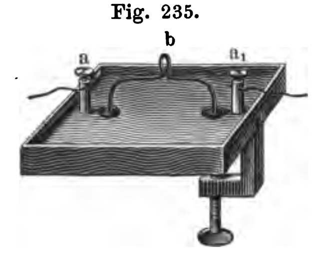


Alle Berührungsstellen zwischen Klemmschrauben und Drähten müssen möglichst blank sein. Die letzteren putzt man mit Schmirgelpapier, die Löcher der ersteren reibt man mit Rund- oder Flachfeilen aus.

3. Stromunterbrecher.

Zum schnellen Unterbrechen resp. Schliessen eines Stromkreises dienen die Stromunterbrecher oder Stromschlüssel. Ein einfacher Stromunterbrecher besteht z. B. aus einem Brettchen, Fig. 235, in das zwei Löcher gebohrt sind, die mit Quecksilber gefüllt werden und mit denen die Klemmschrauben a und a_1 in metallischer Verbindung stehen. Beim Einsetzen und Herausheben des Kupferbügels b wird der Strom geschlossen und geöffnet. Der Unterbrecher wird, falls er nicht, wie in Fig. 235, mit einer Zwinge an dem Tische befestigt wird, in einen flachen Kasten gesetzt, um das Verspritzen von Quecksilber zu vermeiden. Zum

Fig. 235.



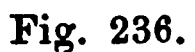
Schliessen und Oeffnen stärkerer Ströme bringt die Technik mannigfache Formen in den Handel (Schalthebel, Anschlussdosen mit Stöpseln, Schnappschlüssel u. s. w.), die auch im Laboratorium und bei den folgenden Uebungen mit Vortheil verwendet werden.

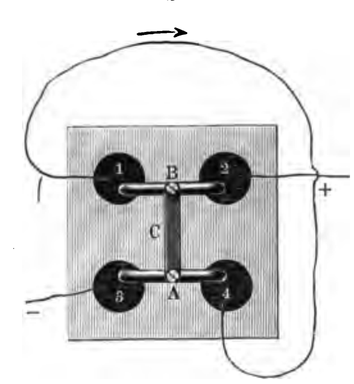
4. Stromwender, Commutatoren oder Gyrotrope.

Dieselben dienen dazu, um in einem Theile der Leitung die Richtung des Stromes umzukehren.

1. Der einfachste Stromwender besteht in einem Brett mit vier Quecksilbernäpfen 1, 2, 3, 4. In dieselben können zwei durch ein isolirendes Zwischenstück *C* verbundene Metallbügel *A* und *B* eingesetzt werden (Fig. 236). Die Näpfe 2 und 3 sind mit der Säule, 1 und 4 mit den Enden des Schliessungskreises verbunden. Verbinden die Bügel 1 und 2, bezw. 3 und 4, so fliesst der Strom im Sinne des Pfeiles, verbinden sie dagegen 1 und 3 bezw. 2 und 4 mit einander, so fliesst er im entgegengesetzten Sinne.

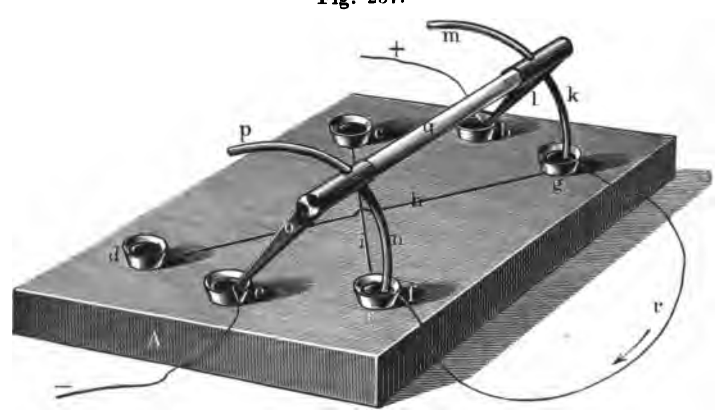
Fig. 236.





2. Gyrotrop von Pohl, „Wippe“. *q* (Fig. 237) ist ein Stab aus isolirendem Material. Die Quecksilbernäpfchen *d* und *g* sind durch den Draht *h*, *c* und *f* durch den Draht *i* verbunden, *h* und *i* berühren sich nicht. Das Näpfchen *b* ist mit dem + Pol, *e* mit dem — Pol des

Fig. 237.

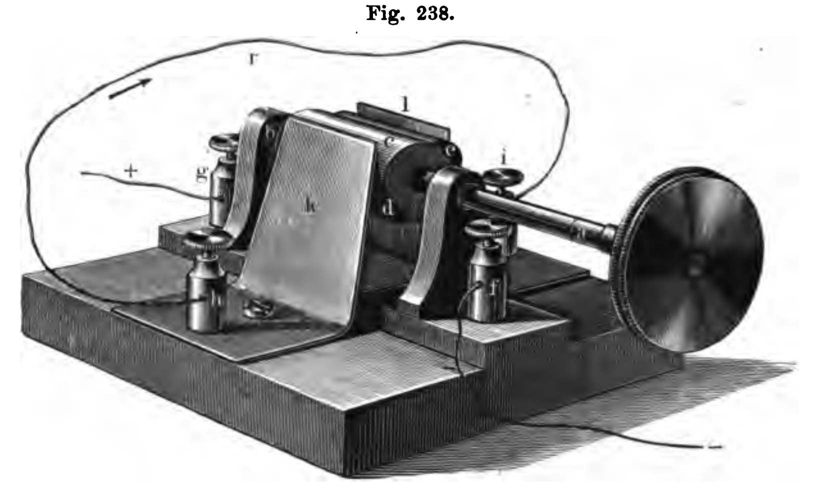


Elementes verbunden, mit *g* und *f* sind die Enden des Theiles der Leitung *r* verbunden, in welchem der Strom umgekehrt werden soll.

Liegt der Bügel, wie die Figur zeigt, so fliesst der Strom durch *r* in der Richtung des Pfeiles. Legt man den Bügel um, so dass *p* nach *d*, *m* nach *c* kommt, so kehrt sich der Strom in *r* um, er fliesst dem Pfeil entgegengesetzt.

3. Gyrotrop von Ruhmkorff. Um eine Axe *ab* (Fig. 238) ist ein Cylinder *c* von Elfenbein drehbar, auf dem zwei Wülste *d* und *e* von

Fig. 238.



Messing befestigt sind. Die Axe *ab* ist in der Mitte des Cylinders *c* getheilt; ihr vorderes Ende *a* steht mit dem Wulst *e* und der Klemmschraube *f*, ihr hinteres Ende mit dem Wulst *d* und der Klemmschraube *g* in leitender Verbindung. Gegen den Cylinder federn die mit den Klemmschrauben *h* und *i* verbundenen Messingplatten *k* und *l*. Die Klemmen *g* und *f* sind mit dem positiven und negativen Pol der Leitung verbunden. In *r* soll die Stromrichtung gewechselt werden. Steht der Cylinder, wie es die Fig. 238 zeigt, so fliesst der Strom von *g* durch *d*, *k* und *h* nach *i*, dreht man den Cylinder um 180°, so fliesst der Strom von *i* nach *h*.

5. Galvanometer.

Zur Untersuchung, ob in einem Leiter Ströme überhaupt vorhanden sind und um dieselben zu messen, dienen die Galvanoskope und Galvanometer. Die Ablenkung der Nadel des Galvanometers soll nur durch die Ströme in seinen Windungen hervorgerufen werden. Um eine Ablenkung durch den Strom in den Zu- und Ableitungsdrähten zu vermeiden, legt man die den Strom zu- und fortführenden Drähte einander möglichst parallel. Man kann die beiden Drähte auch um einander wickeln. Bei beiden Arten von Instrumenten wird meist die Ablenkung einer Magnetnadel aus ihrer ursprünglichen Richtung durch einen parallel derselben verlaufenden Strom benutzt. Sie sind daher nur bei Strömen zu verwenden, die dauernd

in derselben Richtung fliessen, bei sog. „Gleichströmen“, aber nicht bei solchen, die abwechselnd in der einen und der entgegengesetzten Richtung fliessen, bei sog. „Wechselströmen“. Bei letzteren sind die Wirkungen der auf einander folgenden Ströme auf die Magnetnadel entgegengesetzt und heben sich daher ganz oder doch zum Theil auf. Zum Messen der Wechselströme verwendet man meist entweder die elektrodynamischen oder die Wärmewirkungen der Ströme [Elektrodynamometer (vgl. weiter unten) und Hitzdrahtampèremeter].

Je stärker der Strom, um so grösser ist die Ablenkung.

Die Magnetnadel dreht sich entweder um eine verticale Axe: sie bewegt sich in einer horizontalen Ebene, „Horizontalgalvanometer“, oder um eine horizontale Axe: sie bewegt sich in einer verticalen Ebene, „Verticalgalvanometer“.

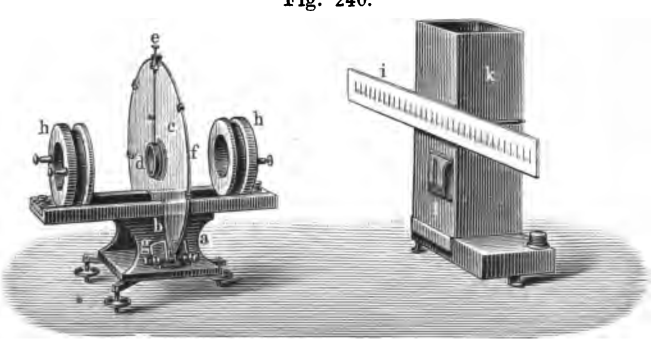
Eine Form des Horizontalgalvanometers ist die folgende:

Fig. 239.



Innerhalb einer Kupferkugel schwebt an einem kurzen, an dem Stabe γ befestigten Faden (Fig. 239) ein Glockenmagnet (vergl. S. 362). Mit ihm ist eine horizontale Aluminiumnadel N verbunden, die über einer Theilung schwebt. Der Magnet wird durch in A und B befindliche Drahtspiralen abgelenkt. Die Klemmschraube C und eine auf der Rückseite befindliche C' führen den Strom zu. Das Galvanometer wird so aufgestellt, dass die Axen der Spiralen A und B in der magnetischen Ostwestrichtung liegen; dann zeigt die Aluminiumnadel auf Null, wenn

Fig. 240.

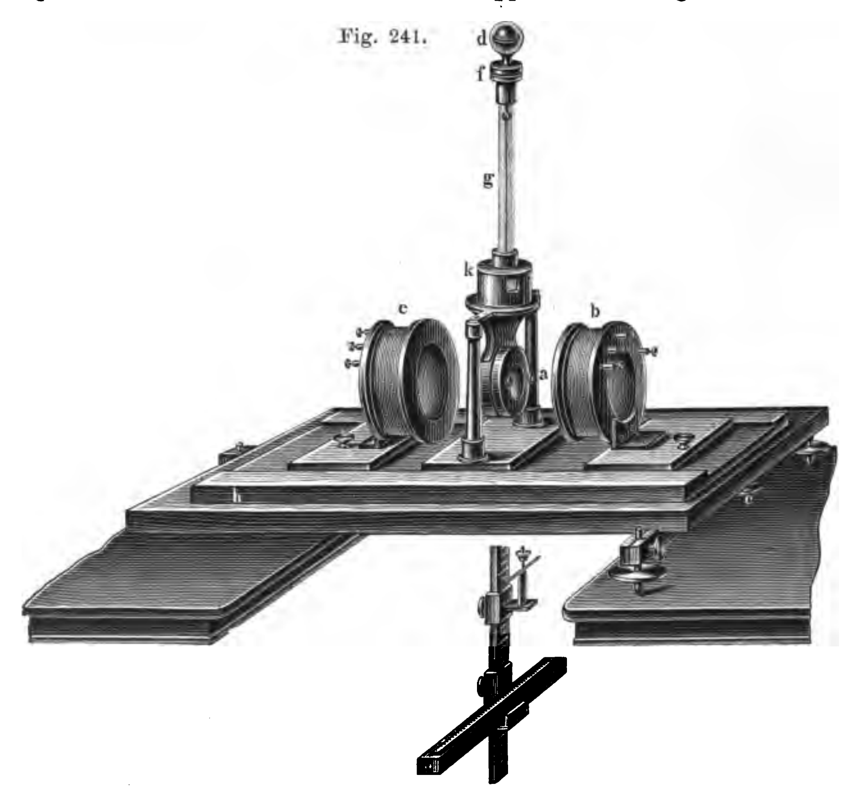


kein Strom durch das Galvanometer geht. Beim Transport lässt man durch Senken von γ den Magneten herunter.

Zu den Horizontalgalvanometern gehören auch die Spiegelgalvanometer.

Eine für Praktikumszwecke geeignete Form ist von G. Quincke angegeben worden (Fig. 240 stellt dieselbe in etwas modificirter Form dar). Der Apparat besteht aus dem auf drei Stellschrauben ruhenden Holzgestell *a*, in dessen Einschnitt *b* die kreisrunde Glasscheibe *c* sitzt. In der Mitte derselben ist die Kammer *d* für den Magneten, der auf einen mittelst Coconfaden an dem Knopfe *e* aufgehängten dünnen Hohlspiegel aufgekittet ist. Um die Glasscheibe ist ein Kupferdraht *f* gelegt, durch welchen durch seitliche Klemmschrauben *g* der Strom geleitet werden kann; so dass der Apparat als Tangentenbussole

Fig. 241.



(vgl. weiter unten) dient. Zur Messung schwächerer Ströme verwendet man zwei in Schlittenführungen verstellbare Spiralen *hh*. Die Ablesung geschieht auf einer Millimeterscala *i*, welche an der zugehörigen Projectionslampe *k* verstellbar befestigt ist. Der Hohlspiegel entwirft von einem an der Lampe angebrachten Drahte *l* ein reelles Bild auf der Scala, das auch ohne Verdunkelung des Zimmers gut gesehen werden kann.

Die Dämpfung der Schwingungen des Magneten geschieht durch die Reibung etc. an der in *d* enthaltenen Luft.

Statt den Magneten und seinen Spiegel in einem engen Raume schwingen zu lassen und durch die Luftdämpfung seine Schwingungen zu beruhigen, lässt man ihn auch in einer Hülse von Kupfer schweben. Schwingt der Magnet, so dämpfen die in dem Kupfer inducirten Ströme die Schwingungen.

Dies ist z. B. bei dem Spiegelgalvanometer von G. Wiedemann der Fall (Fig. 241).

Innerhalb einer von zwei Säulen getragenen Kupferhülse *a* hängt der Ringmagnet *N*; welcher am äusseren Rande zugeschärft und in horizontaler Richtung magnetisirt ist; in denselben ist oben ein Messingdraht eingeschraubt, an dem oben der Spiegel *S* befestigt ist, der innerhalb der mit passenden Ausschnitten und Fenstern versehenen Hülse *k* schwebt. Die Drahtspiralen *b*, *c*, deren Axen mit der Axe der Kupferhülse zusammenfallen, sind auf Schiebern befestigt, mittelst deren sie dem Magnet genähert und von ihm entfernt werden. Die Spiralen haben einen so grossen inneren Durchmesser, dass sie gerade auf die Hülse *a* hinaufpassen; sie lassen sich bis auf einen schmalen Zwischenraum an einander schieben und werden durch Klemmschrauben mit der übrigen Stromleitung verbunden. An dem unter dem Brett *h* gezeichneten Stabe kann man die Astasirungsmagnete befestigen.

Fig. 242. Fig. 243.

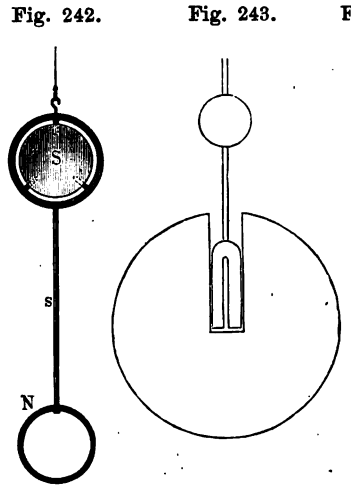
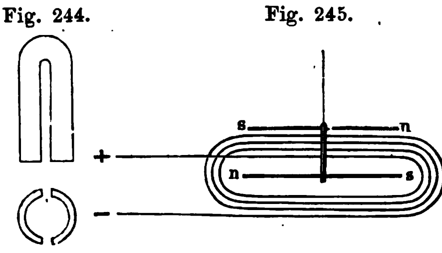


Fig. 244. Fig. 245.



Bei dem Spiegelgalvanometer mit Glockenmagnet von Siemens schwebt innerhalb einer Kupferkugel (Fig. 243) der Glockenmagnet, ein an zwei gegenüberliegenden Seiten der Länge nach aufgeschlitztes Stahlrohr (Seiten- und Unteransicht, Fig. 244). Das Rohr ist so magnetisirt, dass die unteren Hälften desselben entgegengesetzte Polaritäten haben. Die Dämpfung ist hier vorzüglich.

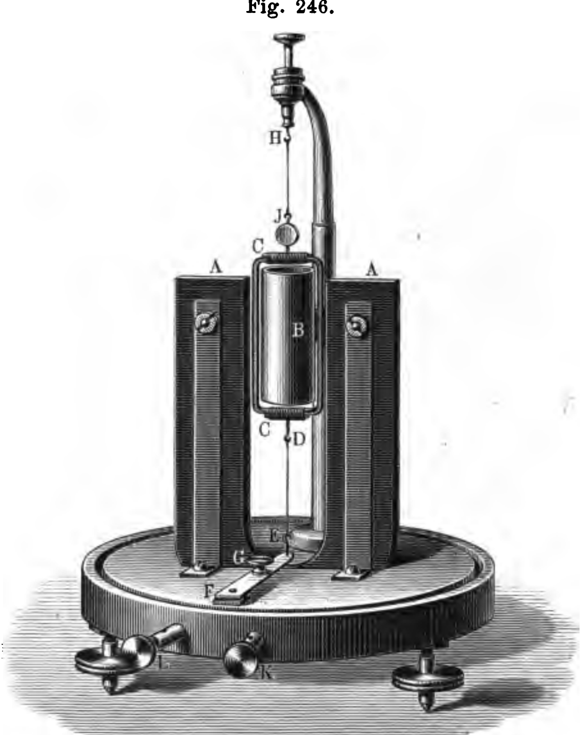
Astatische Galvanometer. Bei dem astatischen Galvanometer ist der eine Magnet der gewöhnlichen Galvanometer durch deren zwei ersetzt, die so angeordnet sind, dass der Nordpol des einen über dem Südpol des anderen liegt.

Dabei hängt man entweder nur den einen Magneten in eine Drahtspirale (Fig. 245), oder man hängt beide in Spiralen; diese müssen

dann aber vom Strome in entgegengesetzter Richtung durchflossen werden.

Bei dem Galvanometer von Deprez und d'Arsonval (Fig. 246) wird die Erscheinung zur Messung von Strömen verwendet, dass eine von Strömen umflossene ebene Figur (ein Rechteck) sich senkrecht zur Richtung eines Magnetfeldes, gebildet durch den Hufeisenmagnet AA und den dazwischen befindlichen Eisencylinder C, in dem sie sich be-

Fig. 246.



findet, zu stellen sucht; also senkrecht zu der Verbindungslinie der Pole des Hufeisenmagneten.

Bei sehr vielen der in der Technik benutzten Strommesser (Fig. 248) dreht sich innerhalb einer Spirale um eine Axe ein auf einer Theilung spielender, eventuell mit einem Gegengewicht versehener Zeiger, der rückwärts excentrisch zur Spirale ein sehr leicht gebogenes Eisenblech trägt. Daseslbe wird beim Durchgang des Stromes durch die Spirale magnetisirt und gegen deren Wände gezogen und dadurch der Zeiger abgelenkt.

2. Verticalgalvanometer. Dasselbe (Fig. 247) besteht aus einem um eine horizontale Axe sich drehenden, innerhalb einer Spirale

befindlichen Magnetstabe *m*, mit dem ein Zeiger *a'* verbunden ist, der über einer Theilung spielt. Dabei können der Magnetstab und die Spiralen horizontal oder vertical stehen.

3. Das Federgalvanometer v. F. Kohlrausch (Fig. 249) besteht aus einem an einer Spiralfeder aufgehängten Hohlcylinder *r* aus weichem

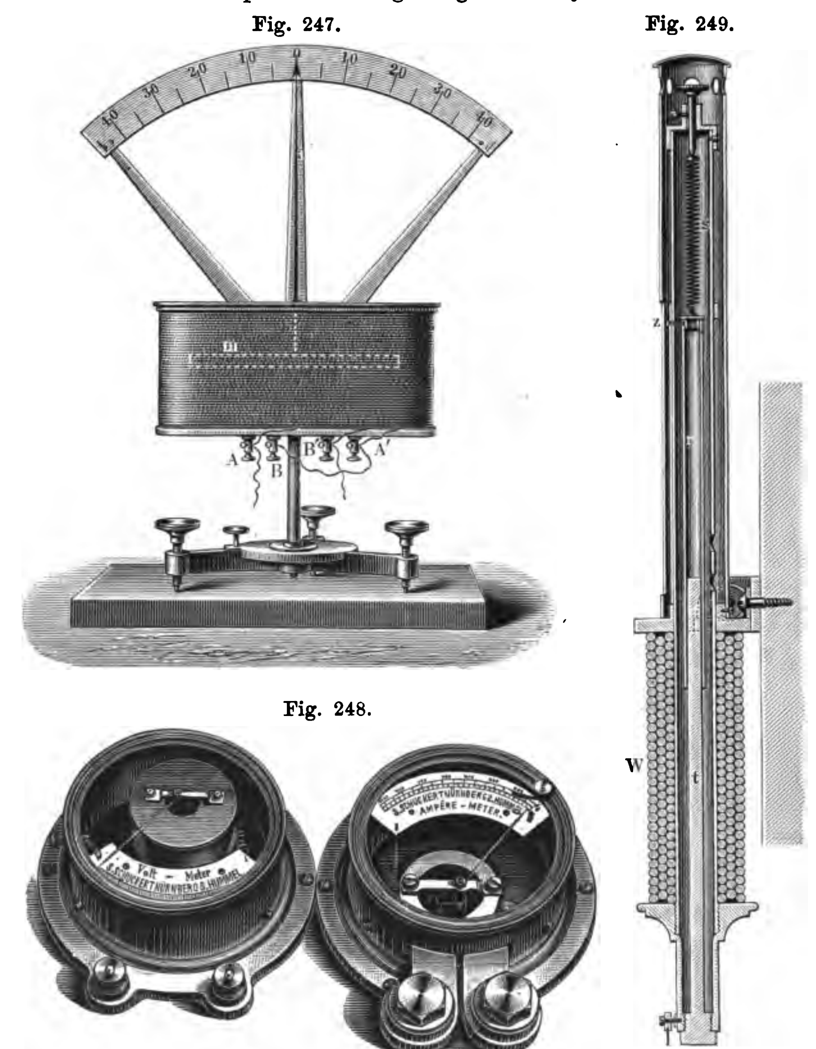


Fig. 247.

Fig. 248.

Fig. 249.

Eisen, der von einem durch die Spirale *W* fliessenden Strome in diese hineingezogen wird, und zwar um so tiefer, je stärker der Strom ist. An einem mit dem Eisencylinder verbundenen Index *z*, der sich längs einer verticalen Scala verschiebt, liest man die Stromstärken in Ampères ab.

4. Verwendung des Nebenschlusses.

Sind bei einem gegebenen Strome die Ausschläge des Galvanometers zu gross, so schaltet man dasselbe in einen Nebenschluss. Dazu verbindet man z. B. bei dem Horizontalgalvanometer die Schrauben C und C', bei dem Verticalgalvanometer A und B' noch durch einen veränderlichen Widerstand, durch den ein Theil des Stromes fliesst; je kleiner der Widerstand im Nebenschluss ist, ein um so kleinerer Theil des Stromes geht durch das Galvanometer (vergl. auch S. 351).

Ist der Widerstand des Galvanometers w_g, der des Nebenschlusses w_n, ist die am Galvanometer gemessene Stromintensität i, so ist die gesammte im Kreise vorhandene Intensität I:

$$I = \frac{(w_g + w_n)\, i_g}{w_n}.$$

Die horizontalen und verticalen Zeigergalvanometer werden zur absoluten Messung der Stromstärke als Ampèremeter benutzt. An einer Theilung wird die einem bestimmten Ausschlag entsprechende Stromstärke abgelesen. Liest man beim Durchleiten des ganzen Stromes durch das Instrument die Milliampère (d. h. $^1/_{1000}$ Ampère) ab, so kann man durch Einschalten von Widerständen in den Nebenschluss, die sich zu dem des Galvanometers wie 1 : 9, resp. 1 : 99, resp. 1 : 999 verhalten, Centiampère, Deciampère und Ampère ablesen.

5. Verwendung der Galvanometer als Voltmeter.

Die Galvanometer messen zunächst Stromstärken, also wenn sie mit einer Theilung versehen sind, die Ampères, sie sind Ampèremeter. Indess können sie auch zur Messung von Spannungsdifferenzen dienen, sie sind dann Voltmeter.

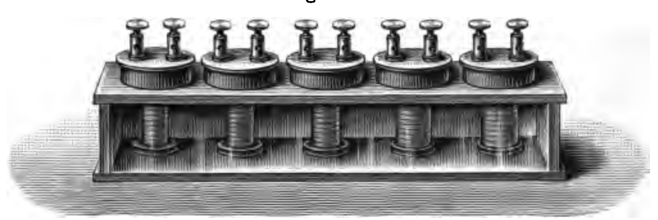
Verbindet man zwei Punkte a und a_1 einer Leitung durch ein Galvanometer mit sehr grossem Widerstande, so ändert sich die Stromstärke in der Leitung kaum; die Stromstärke im Galvanometer und sein Ausschlag hängt ab von der Spannungsdifferenz an den beiden Punkten a und a_1. Das Instrument ist mit einer Theilung versehen, welche die Spannungsdifferenz in Volts angiebt. Man nennt diese Instrumente Voltmeter. Da dieselben aber nie ganz stromlos sind, so geben sie, bei mässig ergiebigen Stromquellen, z. B. gewöhnlichen galvanischen Elementen verwendet, durchgängig zu niedrige Werthe an.

6. Die Rheostaten.

Man hat, um bestimmte Widerstände in den Stromkreis einschalten zu können, solche aus Neusilber- oder Nickelin- bezw. Manganindrahtspiralen hergestellt, die zu Widerstandssätzen, „Rheostaten", zusammengestellt sind. Diese Spiralen sind „bifilar", d. h. so gewickelt, dass der sie durchlaufende Strom zwei entgegengesetzt gerichtete gleiche Solenoide

(s. w. u. unter Elektrodynamik) bildet, deren magnetische Wirkungen nach aussen hin sich aufheben. Wäre dies nicht der Fall, so könnten die Widerstandsspiralen störend auf in der Nähe stehende galvanische Messinstrumente einwirken. Da sie auf diese Weise zugleich „inductionsfrei" gemacht sind, können sie auch bei der Messung von Wechselströmen verwendet werden; eine gewöhnliche Spirale würde in Folge der Selbstinduction diesen einen erheblich viel grösseren Widerstand als einem Gleichstrom entgegenstellen, der Nennwerth des Widerstandes, der sich gewöhnlich auf eine Aichung durch Gleichstrom bezieht, stimmt

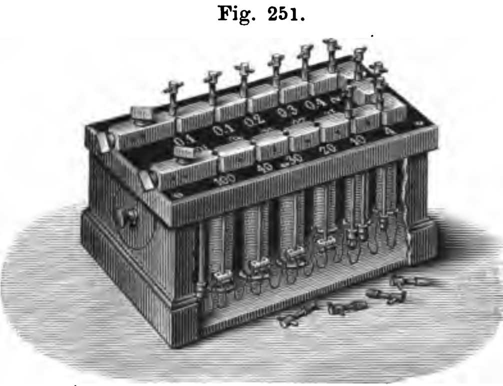
Fig. 250.



dann nicht mehr, worauf namentlich bei Widerstands- und Capacitätsbestimmungen mit dem Telephon zu achten ist.

1. Bei dem Rheostaten (Fig. 250) stehen die Spiralen in einem durch eine Glasplatte geschlossenen Kasten. Die Widerstände der Spiralen (Widerstandsrollen) sind 1, 2, 3, 4, 5 und 10 Ohm (Ω). Durch U-förmige Bügel aus dickem Kupferdraht von sehr kleinem Widerstande kann jede beliebige Combination von zwei oder mehr Spiralen hergestellt werden, und man kann demnach von 1 bis 20 Ohm einschalten, indem man die Bügel in je eine Klemmschraube zweier Spiralen steckt. Die frei bleibenden Klemmschrauben der ersten und letzten Spirale werden mit den Zuleitungsdrähten verbunden.

Fig. 251.

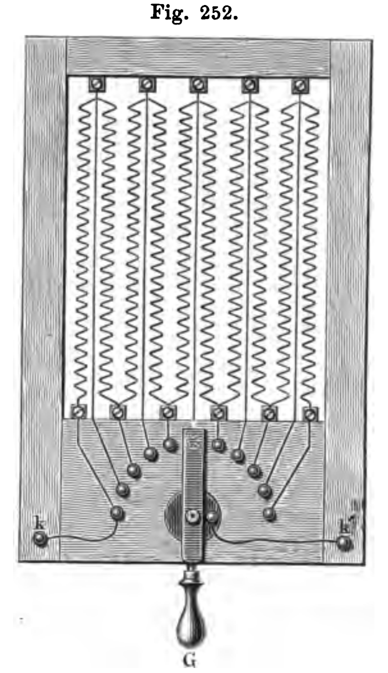


2. Bei dem Siemens'schen Stöpselrheostaten (Fig. 251) sind auf den Deckel des Widerstandskastens dicke Messingplatten befestigt, mit denen je das Ende einer Spirale und der Anfang der folgenden verbunden sind. Der Anfang der ersten und das Ende der letzten Spirale sind mit je einer Klemmschraube verbunden. Zwischen die Messingplatten kann man in schwach conische Ausschnitte Stöpsel stecken. Sind alle Stöpsel herausgenommen, so durchfliesst der Strom die sämmtlichen

Spiralen; wird ein Stöpsel eingesetzt, so geht der Strom durch ihn und nicht durch die Spirale. Der betreffende Widerstand ist ausgeschaltet. (In der Figur sind eingeschaltet $100 + 40 + 30 + 20 = 190\,\Omega$.)

Ein Stöpsel ist mit einer Klemmschraube versehen, in der ein Draht befestigt werden kann; mittelst desselben kann dann ein Strom von einer beliebigen Stelle des Rheostaten aus abgezweigt werden („Laufstöpsel").

Fig. 252.



3. Bei dem Kurbelrheostaten, von dem *H* (Fig. 257, S. 374) eine Ansicht von oben giebt, befinden sich die Widerstandsrollen in einem Kasten. Das eine Ende einer jeden Rolle ist mit der einen der beiden Klemmschrauben verbunden, das andere mit einem der Metallknöpfe, die in der Figur als schwarze Kreise erscheinen. Mit der anderen Klemmschraube ist metallisch verbunden eine Metallkurbel, die sich um eine in der Mitte des Kastens befindliche Axe drehen und mit irgend einem der Knöpfe in Contact bringen lässt. Die beiden Klemmschrauben dienen zum Zu- und Ableiten des Stromes, der je nach der Stellung der Kurbel verschieden grosse Widerstände durchfliesst.

4. Bei anderen solchen Kurbelrheostaten (Fig. 252) sind Bänder oder offen gewickelte Spiralen aus einer Metalllegirung, welche ihren Widerstand mit der Temperatur nur unmerklich ändert, in einem Rahmen frei ausgespannt (damit Luftzug die Drähte kühlen kann); ihre Enden sind mit Metallknöpfen verbunden, auf denen die Kurbel schleift.

In der Figur geht der Strom von der Klemmschraube *k'* durch die Kurbel und die auf der linken Seite des Brettes ausgespannten Spiralen (die geraden Drähte sind in diesem Falle aus dicken, gut leitenden Kupferdrähten hergestellt, deren Widerstand vernachlässigt werden kann).

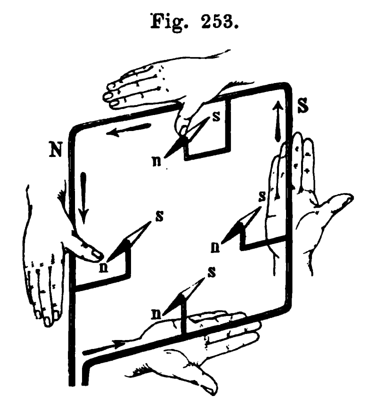
IIb. Ampère'sche Regel. Prüfung des Ohm'schen Gesetzes.

1. Ampère'sche Regel.

Gebraucht wird: Chromsäureelement; Leclanché-Element; Daniell'sches Element; Trockenelement; Draht; Magnetnadel.

Einleitung. Leitet man an einer Magnetnadel einen Strom vorbei, so wird dieselbe abgelenkt. Kehrt man den Strom um, so kehrt sich die Richtung der Ablenkung um, die durch die Ampère'sche Regel bestimmt ist: Man denkt sich selbst in dem vom Strome durchflossenen Leiter, in der Richtung des Stromes schwimmend, das Gesicht der Nadel zugewandt, dann wird der Nordpol der Nadel nach links, der Südpol nach rechts abgelenkt, oder:

Fig. 253.



Legt man die rechte Hand so neben den Strom, dass sie in der Richtung desselben zeigt und der Magnet auf der Seite der Handfläche liegt, so wird stets der Nordpol nach dem Daumen hin abgelenkt (Fig. 253).

Uebung. 1) Ein gerader Draht wird mit den Polen eines Chromsäureelementes verbunden, abwechselnd über und unter und neben eine Magnetnadel gehalten und der Strom in ihm durch Aendern der Drahtverbindungen umgekehrt. Man vergleicht die Richtung der Ablenkung mit der durch die obige Regel bestimmten.

2) Die Stromrichtung wird mittelst einer Magnetnadel in dem Schliessungsdraht eines Leclanché- oder Daniell-Elementes bestimmt und daraus der positive und negative Pol derselben ermittelt; der Strom geht ausserhalb des Elementes von der Kohle zum Zink, also im Sinne des Alphabetes von dem einen Pol zum anderen.

3) Derselbe Versuch wird mit einem verschlossenen Trockenelement angestellt und die an demselben nicht näher bezeichneten Pole bestimmt.

2. Prüfung des Ohm'schen Gesetzes.

Gebraucht wird: Apparat auf S. 255. Bretter mit verschiedenen Drähten, Fig. 256, kleine Glühlampe.

Einleitung: Vergl. auch S. 348. Damit Elektricität von einer Stelle A eines Leiters zu einer anderen Stelle B desselben strömt, muss zwischen beiden ein Unterschied in der elektrischen Spannung, ein Potentialunterschied, eine elektromotorische Kraft vorhanden sein. Auf einem von einem Strome durchflossenen Draht AB nimmt die Spannung stetig von A nach B ab. Den Abfall auf der Längeneinheit nennt man das Spannungsgefälle. Der gesammte Spannungsunterschied zwischen zwei Stellen eines Drahtes ist bei einer bestimmten Stromstärke proportional dem elektrischen Widerstande, also umgekehrt proportional der Leitfähigkeit zwischen A und B.

Die Menge der in der Zeiteinheit zwischen zwei Punkten A und B strömenden Elektricität, d. h. die Stromstärke oder Intensität, ist der zwischen ihnen vorhandenen elektromotorischen Kraft proportional.

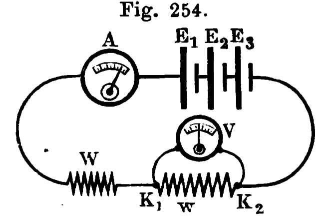
Aus dem S. 349 Angeführten ergeben sich dann folgende experimentell zu prüfende Sätze:

Auf einem Drahte von durchweg gleichem Material und constantem Querschnitt ist der Spannungsunterschied oder die elektromotorische Kraft auf gleichen Längen die gleiche, auf verschiedenen Längen ist sie diesen proportional.

Auf Drähten von verschiedenem Querschnitte, aber gleichem Material und gleicher Temperatur ist die elektromotorische Kraft umgekehrt proportional dem Querschnitte, d. h. die elektrischen Leitungswiderstände sind dem Querschnitte der Leitung umgekehrt proportional.

Auf Drähten von verschiedenem Material, aber von gleicher Länge und gleichem Querschnitte ist das Spannungsgefälle verschieden, d. h. die Widerstände von Drähten gleicher Dimension aus verschiedenem Material sind verschieden. Die Verschiedenheit wird durch die auf eine bestimmte Einheit bezogenen Verhältnisszahlen dieser Widerstände, die sogen. specif. Widerstände, gemessen.

Fig. 254.



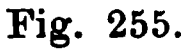
Die Intensität eines Stromes ist direct proportional der elektromotorischen Kraft, und umgekehrt, die elektromotorische Kraft an den Enden eines Drahtes ist proportional der Intensität. Bei der Prüfung dieser Beziehungen ergiebt sich das Ohm'sche Gesetz und bei Zugrundelegung der Einheiten Ampère, Volt und Ohm folgt, dass bei einem Spannungsunterschiede von 1 Volt durch einen Draht von 1 Ohm ein Strom von 1 Ampère fliesst.

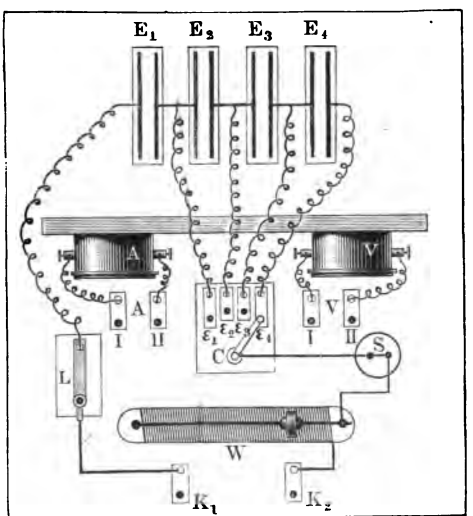
Apparat. Das Schema der Anordnung giebt Fig. 254. E_1, E_2, E_3 ist die stromliefernde Kette, W ein regulirbarer Vorschaltwiderstand,

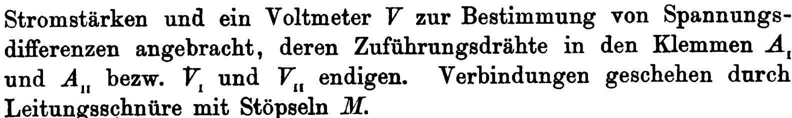
A ein Ampèremeter, w der Draht, an dem das Spannungsgefälle gemessen werden soll, V das dazu dienende Voltmeter.

Im Einzelnen haben wir dem Apparate die folgende Gestalt gegeben:

Auf einem Grundbrette (Fig. 255) stehen vier Accumulatoren E_1, E_2, E_3, E_4, die durch die Kurbel C (Zellenschalter) mit den Ableitungsstellen K_1 und K_2 so verbunden werden können, dass zwischen K_1 und K_2 beliebig eine elektromotorische Kraft E_1, $2\,E_1$, $3\,E_1$, $4\,E_1$ eingeschaltet werden kann. Ein Rheostat W, ein Stromschlüssel L und eine Bleisicherung S sind in die Zuführungsleitungen zu den Klemmen K_1 und K_2 eingeschaltet. An einem auf dem Grundbrette senkrecht befestigten Brett ist ein Ampèremeter A zur Messung der

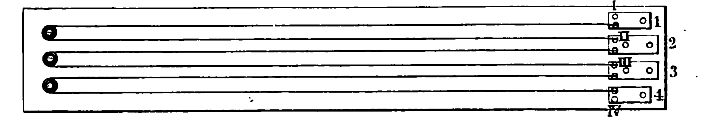

Fig. 255.




Stromstärken und ein Voltmeter V zur Bestimmung von Spannungsdifferenzen angebracht, deren Zuführungsdrähte in den Klemmen A_{I} und A_{II} bezw. V_{I} und V_{II} endigen. Verbindungen geschehen durch Leitungsschnüre mit Stöpseln M.

Auf drei Brettern I, II, III, Fig. 256, sind je drei Drähte gespannt, deren Enden in Messingklötzen 1, 2, 3, 4 endigen. Als

Fig. 256.



Stromzuführungsklemmen dienen die in 1 und 4 ausserdem eingebohrten Stöpsellöcher I und II. Brett I enthält drei ganz gleiche Drähte von je einem Ohm Widerstand. Brett II drei Drähte von gleichem Material und gleicher Länge, aber verschiedenem Durchmeser (1 mm, 0,7 mm, 0,5 mm). Brett III drei Drähte von verschiedenem Material, aber gleichem Querschnitte, 0,7 mm, und gleicher Länge, 2 m (Messing, Eisen, Nickelin).

Auf einer Reihe anderer Bretter sind befestigt: a) Drähte von

verschiedener Länge und verschiedenem Querschnitte zur Bestimmung des specifischen Widerstandes, und b) eine Glühlampe von kleiner Spannung zum Anschluss mit den Stöpseln eingerichtet.

Uebung 1. Abhängigkeit des Spannungsabfalles von der Länge. Mit Brett I.

1) Man schaltet so viel Widerstand ein, dass ein Strom von 1 Ampère die ganze Leitung durchfliesst.

2) Man misst die Spannung zwischen den Klemmen 1 und 2, 2 und 3, 3 und 4, also an den Enden von je 1 Ohm Widerstand. Sie ist stets gleich

$$e_{12} = e_{23} = e_{34}.$$

An allen Stellen eines Drahtes von gleicher Beschaffenheit ist auf gleicher Länge die Spannungsdifferenz die gleiche.

3) Man misst die Spannung zwischen 1 und 2, 2 und 3, 3 und 4, es ist

$$e_{13} = 2\,e_{12}, \quad e_{14} = 3\,e_{12}.$$

Die Spannungsdifferenz ist proportional der eingeschalteten Länge.

In allen Fällen ist E (Volt) $= J$ (Ampère) $\times$ W (Ohm).

Uebung 2a. Abhängigkeit des Spannungsabfalles von dem Querschnitte (S. 369). Mit Brett II.

1) Man bestimmt die Querschnitte q_1, q_2, q_3 der drei Drähte.

2) Man schaltet nach einander die Drähte 1, 2 und 3 des Brettes II ein, regulirt stets durch Schieben am Widerstande W die Stromstärke auf 1 A und misst den Spannungsabfall e_1, e_2, e_3.

Es ist

$$e_1 : e_2 = q_2 : q_1, \quad e_1 : e_3 = q_3 : q_1, \quad e_2 : e_3 = q_3 : q_2.$$

Die Spannungsabfälle verhalten sich umgekehrt wie die Querschnitte.

Uebung 2b. Man führt den Strom in I_1 zu und in IV_4 ab, so dass er die drei Drähte hinter einander durchfliesst, die Spannungsabfälle sind e_{12}, e_{23}, e_{34}, es ist

$$e_{12} : e_{23} = q_2 : q_1 \text{ u. s. f.}$$

Auch für hinter einander geschaltete Drähte gilt der Satz.

Uebung 3. Abhängigkeit des Spannungsabfalles vom Material.

1) Man schickt stets denselben Strom (etwa 1,5 Ampère) durch die drei Drähte und bestimmt die Spannungsabfälle e_{Nickelin}, e_{Eisen}, e_{Messing}, es ist $e_{\text{Nickelin}} = 3{,}15$ Volt, $e_{\text{Eisen}} = 1$ Volt, $e_{\text{Messing}} = 0{,}68$ Volt. Die specifischen Widerstände verhalten sich also wie 3,15 : 1 : 0,61.

Uebung 4a. Abhängigkeit der Stromstärke von der elektromotorischen Kraft und dem Widerstande.

Wir nehmen an 1) die elektromotorischen Kräfte E_1 der Accumulatoren 1, 2, 3, 4 seien gleich (was sich auch leicht mit dem Apparate prüfen

lässt), und 2) ihr innerer Widerstand sei Null (er ist in der That sehr klein).

1. Abhängigkeit von der elektromotorischen Kraft.

1) Man stellt den Zellenschalter auf ε_1, dann hat man ein Element und die E. M. K. E_1 eingeschaltet, man verstellt den Widerstand W, bis man einen Strom von a Ampère ($a = 0,4$) hat.

2) Man stellt C auf ε_2, ε_3, ε_4. Die Stromstärke wird $2a$, $3a$, $4a$ Ampère. Sie ist proportional der elektromotorischen Kraft der Kette.

2. Abhängigkeit von dem Widerstande.

Durch Vorversuche ist ermittelt, welche Stellung man dem Vorschaltrheostaten geben muss, damit der Widerstand der Leitung von K_1 bis K_2 (Ampèremeter, Vorschaltwiderstand und Drähte) $= 2\,\Omega$ ist.

1) Man schaltet zwei Accumulatoren ein, verbindet K_1 und K_2 kurz, man erhält eine Stromstärke i_1.

2) Man schaltet auf Brett I einen Draht $= 1$ Ohm ein, der Widerstand wird $2 + 1 = 3$ Ohm, die Stromstärke wird $i_2 = {}^2/_3\, i_1$.

3) Man schaltet die Drähte 1,2 + 2,3 und 1,2 + 2,3 + 3,4 ein, die Stromstärke wird $i_3 = {}^2/_4\, i_1$ und $i_4 = {}^2/_5\, i_1$.

Uebung 4b. Abhängigkeit des Potentialgefälles von der Stromstärke längs eines Drahtes.

1) Man schaltet irgend einen Draht in den Stromkreis und bestimmt das Potentialgefälle E. Man ändert mittelst des Rheostaten W die Stromstärke J, die man am Ampèremeter misst; es ist stets E proportional mit J.

Uebung 5. Bestimmung des Widerstandes W eines beliebigen Drahtes.

1) Man misst bei einer Stromstärke J an den Enden des Drahtes das Potentialgefälle E, dann ist

$$W\text{ (Ohm)} = \frac{J\text{ (Ampère)}}{E\text{ (Volt)}}.$$

Nun ist $W = \varepsilon \frac{l}{q}$ (wo ε der specifische Widerstand ist).

2) Man misst l und den Durchmesser $d = 2r$ des Drahtes (dann ist $q = \pi \frac{d^2}{4}$) und berechnet daraus ε in Ohm.

Uebung 6. Bestimmung des Widerstandes in einer Glühlampe.

Die Methode eignet sich besonders zur Bestimmung des Widerstandes eines stromdurchflossenen Leiters, etwa einer glühenden Glühlampe.

Man verfährt ganz wie bei 5.

III. Bestimmung des elektrischen Leitungswiderstandes.

Einleitung. In Bezug auf ihr Verhalten beim Durchgange des elektrischen Stromes kann man die Leiter in zwei Classen eintheilen: Leiter erster und zweiter Classe.

Die Leiter erster Classe werden beim Durchgange des Stromes nicht chemisch zersetzt (zu ihnen gehören die Metalle, Superoxyde, Kohle), die Leiter zweiter Classe erfahren beim Durchgange des Stromes eine Zersetzung (zu ihnen gehören die Lösungen von Salzen, Säuren, Basen). Die Zersetzung eines stromdurchflossenen Leiters zweiter Classe nennt man Elektrolyse. Daher bezeichnet man auch die Leiter erster Classe als Nichtelektrolyte, diejenigen zweiter Classe als Elektrolyte.

Bei weitaus den meisten Leitern erster Classe nimmt der Widerstand mit der Temperatur zu, bei denen zweiter Classe ab.

1. Leiter erster Classe.

Gebraucht wird: A. Widerstandskasten (Fig. 250), Neusilberdrahtwiderstände von verschiedenen Längen und Dicken auf Holzspindeln mit Kasten zum Einlegen (Fig. 257); Siemenswiderstände; Unterbrecher; Leclanché-Element; Quecksilber; Galvanometer (Fig. 240); Hülfswiderstandskasten; Verbindungsdrähte. — B. Wheatstone'sche Brücke (Fig. 260) mit den Drahtverbindungen; Neusilberdrahtwiderstände wie oben; 1 m lange Drähte von verschiedenen Metallen auf Holzlatten; Galvanometer und Unterbrecher wie oben; Zusatzwiderstand; Mikrometer (Fig. 16, S. 19).

A. Bestimmung nach der Substitutionsmethode.

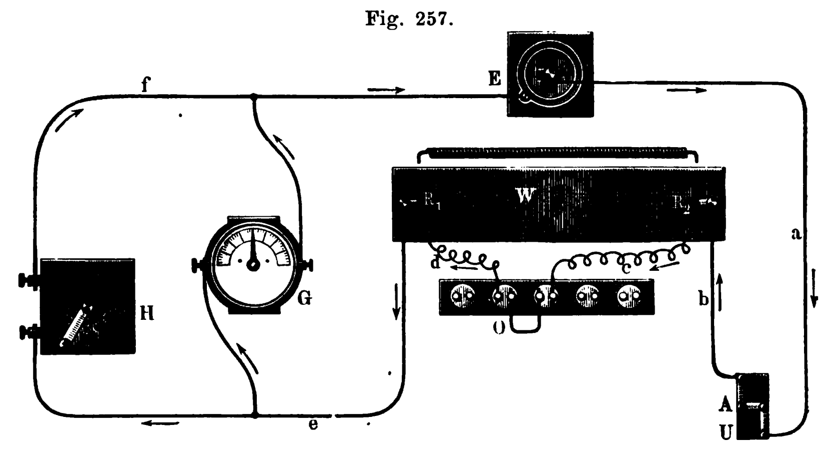
Princip. Zwei Widerstände sind einander gleich, wenn sie nach einander an einer Stelle eines sonst unveränderten Schliessungskreises eingeschaltet werden und dabei die Stromstärke jedesmal den gleichen Werth hat.

Dieser Satz folgt aus der Definition des Widerstandes (S. 348); er wird benutzt bei der Bestimmung elektrischer Leitungswiderstände nach der Substitutionsmethode. Man schaltet in einen Leiterkreis, der ein Element E und ein Galvanometer G enthält, den zu bestimmenden Widerstand W ein. Man erhält eine bestimmte Stromstärke i und dem entsprechend einen bestimmten Galvanometerausschlag α. Dann

nimmt man W aus dem Kreise heraus und schaltet an seiner Stelle so viele Widerstandseinheiten ω ein, bis der Galvanometerausschlag wieder gleich α wird; dann ist $W = \omega$. Sollte W zwischen zwei mit dem Widerstandskasten herstellbaren Widerständen ω_1 und ω_2 liegen, so erhält man seinen Werth durch Interpolation (vergl. die Uebung).

Apparat. a) Erste Anordnung. Die zu messenden Widerstände sind dünne Neusilberdrähte, welche auf Holzspindeln gewickelt sind. Sie tragen an beiden Enden rechtwinkelig umgebogene, dicke Kupferbügel B_1 und B_2, an welche die Enden der Neusilberdrähte angelöthet sind. Die Holzspindeln werden in einen flachen Kasten W (Fig. 257) gelegt, so dass sie mit den Kupferbügeln B_1 und B_2 in

Fig. 257.



zwei mit Quecksilber gefüllte Rinnen R_1 und R_2 tauchen; zu diesen führen von Klemmschrauben kupferne Bügel. Wir benutzen zwei lange und zwei kurze Spindeln, auf letzteren befindet sich ein ebenso dicker, aber nur halb so langer Draht wie auf ersteren, ferner eine lange Spindel mit halb so dickem Draht wie auf den ersten.

Die Gesammtanordnung des Apparates giebt Fig. 253. E ist das Element; G das Galvanometer; W ist der erwähnte flache Kasten (derselbe steht bei den Versuchen weiter vom Galvanometer ab); O der Vergleichswiderstand; U ein Unterbrecher.

Zu dem Galvanometer wird ein Nebenschluss geschaltet. Man verzweigt vor dem Eintritt in dasselbe die Leitung und schaltet in den einen Zweig das Galvanometer G, in den anderen einen Hülfswiderstand H ein. Je nachdem man hier mehr oder weniger Widerstand einschaltet, geht mehr oder weniger Strom durch das Galvanometer.

Uebung. 1) Man legt eine lange Spindel mit dem gesuchten Widerstande W_x in den Kasten (Fig. 257), schliesst den Strom bei U und wartet, bis die Nadel zur Ruhe gekommen ist: Ausschlag α. Dann

öffnet man sofort wieder. Durch Ein- bezw. Ausschalten von Widerstand bei H kann man dem Ausschlag eine angemessene Grösse (40 bis 50°) geben.

2) Man nimmt die Spindel aus R_1 und R_2 und schaltet einen solchen Widerstand ω des Widerstandskastens ein (durch Eintauchen der mit den Klemmschrauben desselben verbundenen Drähte in die Quecksilberrinnen des Kastens W), dass beim Schliessen bei U der Ausschlag möglichst nahe gleich α wird. Ist er bei $\omega\,\Omega$ gleich α_1 ($\alpha_1 > \alpha$), bei $(\omega + 1)\,\Omega$ gleich α_2 ($\alpha_2 < \alpha$), so ist:

$$W_x = \left(\omega + \frac{\alpha_1 - \alpha}{\alpha_1 - \alpha_2}\right)\Omega.$$

Beispiel: $\alpha = 59^0$. Bei $\omega = 10\,\Omega$ $\alpha_1 = 62^0$, bei $\omega = 11$ $\alpha_2 = 58$. $W_x = 10^3/_4\,\Omega$.

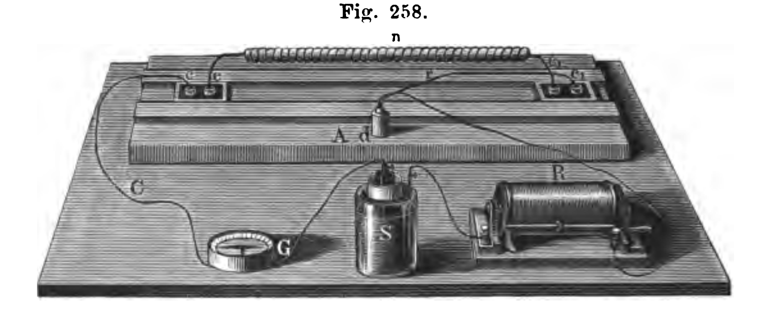
3) Man bestimmt den Widerstand der beiden kurzen Spindeln.

4) Man bestimmt den Widerstand der beiden langen Spindeln, wenn sie neben einander in dem Kasten W liegen.

5) Man bestimmt den Widerstand der Spindel mit halb so dickem Drahte.

Man findet $W = \varepsilon . l/q$ (vergl. S. 349). Liegen beide Spindeln neben einander, so findet der Strom eine Leitung von doppelt so grossem

Fig. 258.



Querschnitt, der Widerstand ist halb so gross, als bei einer Spirale von der gleichen Länge.

b) Zweite Anordnung.

Princip und Apparat. In den von einer Kette S kommenden Strom sind eingeschaltet ein Galvanometer G, eventuell ein Nebenschluss und ein Rheostat R, ausserdem kann man den zu messenden Widerstand n einschalten oder nicht einschalten; man schaltet erst den Rheostaten allein ein und bestimmt den Ausschlag am Galvanometer, dann den Rheostaten und Widerstand und schaltet vom ersteren so viel aus, dass der Ausschlag des Galvanometers wieder der ursprüngliche wird, dann ist der gesuchte Widerstand gleich dem des ausgeschalteten Rheostaten.

Uebung. 1) Man taucht den Draht r in den Quecksilbernapf c, und schaltet entweder in den Rheostaten R so viel Widerstand ein, oder in den (nicht in der Figur gezeichneten Nebenschluss) zum Galvanometer so viel Widerstand aus, bis der Ausschlag ein passender (ca. 45°) geworden ist, und liest die Stellung des Index an R ab: ω_1.

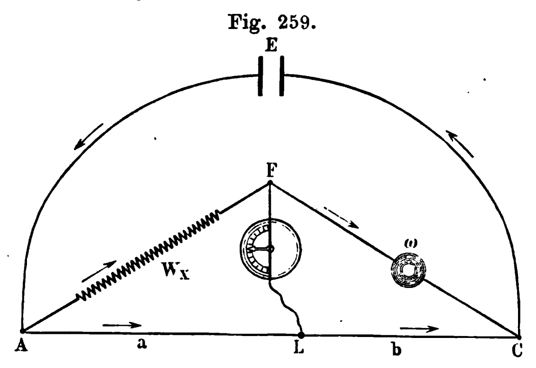
2) Man taucht den Draht in den Quecksilbernapf c_1 und schaltet den zu untersuchenden Widerstand zwischen e und e_1 ein. Der Ausschlag nimmt ab.

3) Man schaltet an R so viel Widerstand aus, bis der Ausschlag wieder der frühere geworden ist und liest die Stellung des Index ab: ω_2. Dann ist $W_x = \omega_1 - \omega_2$.

B. Bestimmungen mit der Wheatstone'schen Brücke.

Princip. Legt man in eine von der Kette E (Fig. 259) ausgehende, in zwei Zweige AFC und ALC sich theilende Leitung die

Fig. 259.



„Wheatstone'sche" Brücke (vergl. S. 351) FL vom einen zum anderen Zweige, so fliesst im Allgemeinen ein Strom durch FL.

Sind W_x, a, ω, b die Widerstände der vier Theile der Leitung, so geht (S. 351), wie sich aus den Kirchhoff'schen Sätzen über Stromverzweigung ergiebt, kein Strom durch die Brücke, wenn

$$W_x : a = \omega : b.$$

Kennt man a, b und ω, so ergiebt sich W_x:

$$W_x = \omega \,.\, a/b.$$

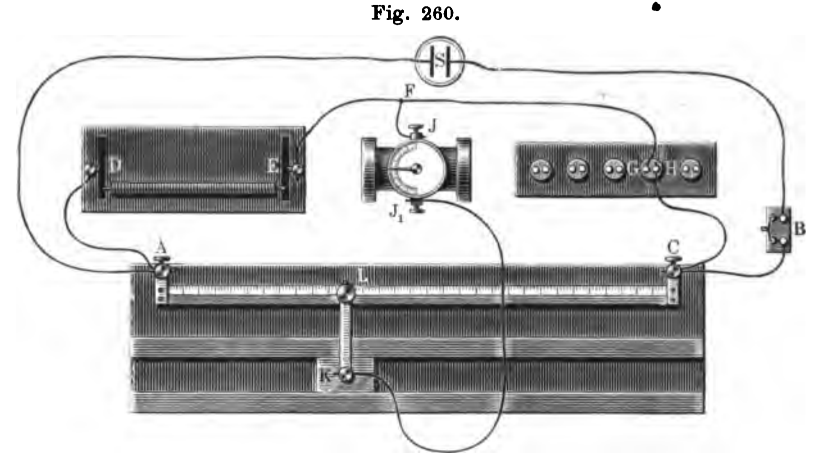
Um diese Drahtcombination als Messinstrument zu verwenden, verbindet man A und C (Fig. 260) durch einen überall gleich dicken Neusilber- (Platiniridium- oder Nickelin- oder Manganin-) draht, den „Messdraht" und lässt den Verzweigungspunkt L längs desselben gleiten.

Apparat. Der Messdraht AC (Fig. 259 und 260) ist längs eines in Millimeter getheilten Meterstabes ausgespannt, der auf einem grösseren Brette befestigt ist. Der Schlitten K, der in einer Schwalbenschwanzführung längs dieses Stabes verschiebbar ist, trägt eine Feder,

an deren Ende unten eine Schneide angelöthet ist. Dieselbe wird durch Niederdrücken des Knopfes L mit dem Drahte in Contact gebracht. An das feste Ende der Feder ist eine Klemmschraube K angelöthet. Man schaltet zwischen A und F den zu bestimmenden Widerstand W_x, zwischen F und C bekannte Widerstände ω und in die Brücke FL ein Galvanometer JJ_1 ein; bei B ist ein Unterbrecher eingeschaltet. Das Galvanometer giebt einen Ausschlag, sobald durch FL ein Strom fliesst.

Der von dem Elemente S ausgehende Strom verzweigt sich bei A in $ADEFGHC$ und ALC, von C geht er nach dem Elemente zurück. Drückt man die Feder bei L nieder, so ist eine Brücke FJJ_1K zwischen

Fig. 260.



den beiden Zweigen hergestellt. Verschiebt man den Schlitten K und damit die Berührungsstelle L, so ändert sich das Verhältniss der Längen a mm und $b = (1000 - a)$ mm der beiden Theile des einen Zweiges. Man verschiebt L, bis durch die Brücke kein Strom geht, dann ist, da der Draht AC an allen Stellen gleich dick ist (Fig. 259)

$$W_x : \omega = \text{Widerst. in } a : \text{Widerst. in } b = a : b = a : (1000 - a),$$

es ist also, vgl. Tabelle 24:

$$W_x = \omega \,.\, a/b = \omega \,.\, a/(1000 - a).$$

Uebung 1. Messung der Widerstände derselben Neusilberdrähte wie oben.

1) Man stellt das Galvanometer so auf, dass die Nadel auf 0 zeigt, wenn kein Strom durch das Galvanometer geht.

2) Man schaltet zwischen D und E den zu messenden Widerstand ein (die Kupferdrähte an demselben müssen gut amalgamirt sein).

3) Man schaltet zwischen G und H so viel Ohm zur Vergleichung ein, dass die Nadel des Galvanometers zur Ruhe kommt, wenn der Schleifcontact L ziemlich nahe in der Mitte des Messdrahtes steht, da dann Ablesungsfehler den kleinsten Einfluss haben.

4) Man schiebt L, bis das Galvanometer nicht mehr ausschlägt.

5) Man liest die Stellung von L auf der Theilung ab: a.

6) Man berechnet W_x.

Es ergiebt sich wieder $W_x = \varepsilon . l/q$.

Uebung 1a. Vergleichung von Widerständen in Siemens mit solchen in Ohm.

Einige einem in Siemens geaichten Widerstandskasten entnommene Widerstände mit der Aufschrift 2,5, 10, 90 Siemens werden zwischen F und A eingeschaltet und ihr Widerstand wie oben in Ohm bestimmt. Es ergiebt sich, dass $1\,\Omega = 1{,}063$ Siemens und 1 Siemens $= 0{,}938\,\Omega$ ist.

Uebung 2. Messung des Widerstandes von Glühlampen in kaltem Zustande.

Man verfährt wie bei Uebung 1. Bei Glühlampen von 16 Kerzen bei 110 Volt muss der Vergleichswiderstand zwischen F und C etwa 100 bis 200 Ohm betragen.

Uebung 3. Messung eines Zuleitungswiderstandes w_x.

Zwischen D und A wird statt des vorher zur Verbindung dienenden Kupferdrahtes von sehr kleinem Widerstande ein Stück eines dünnen Neusilberdrahtes von dem unbekannten Widerstande w_x eingeschaltet.

Es soll gleichzeitig bestimmt werden der Widerstand des Neusilberdrahtes W_x und der Widerstand w_x in der Zuleitung (die Widerstände der kupfernen Zuleitungsdrähte sind zu vernachlässigen). Dies geschieht durch eine Doppelmessung bei Vertauschung der Widerstände W_x und ω.

1) Man bestimmt den Widerstand, wenn W_x zwischen D und E eingeschaltet ist. Man erhält:

$$W_x + w_x = \omega . a_1/b_1 \quad \text{oder} \quad w_x = \omega . a_1/b_1 - W_x \quad . \quad . \quad 1)$$

2) Man schaltet ω zwischen D und E, W_x zwischen F und C, dann ist:

$$\omega + w_x = W_x . a_2/b_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

also

$$W_x = \omega . (1 + a_1/b_1)/(1 + a_2/b_2).$$

Hat man nach dieser Formel W_x berechnet, so erhält man w_x aus Formel 1).

Bemerkung. Bei genauen Messungen oder bei der Messung sehr kleiner Widerstände muss man die Zuleitungswiderstände in dieser Weise messen und berücksichtigen.

Beispiel: $\omega = 10\,\Omega$, $a_1 = 560$, $b_1 = 440$ mm; $a_2 = 570$, $b_2 = 430$ mm. $W_x = 9{,}8\,\Omega$, $w_x = 2{,}9\,\Omega$.

Uebung 4. Bestimmung der specifischen Leitungswiderstände verschiedener Metalle.

1) Man schaltet l m lange, auf Holzlatten ausgespannte Drähte verschiedener Metalle zwischen D und E ein und bestimmt deren Widerstand.

2) Man misst den Durchmesser D der Drähte mit dem Dickenmesser, der Querschnitt ist dann: $q = \pi \, (^1/_2 \, D)^2$ qmm.

3) Man misst die Länge l der Drähte.

Berechnung. Nach S. 349 ist $w = \varepsilon . l/q$, also $\varepsilon = w . q/l$ und das specifische Leitvermögen $\varDelta = 1/\varepsilon$.

Beispiel: Neusilber $W = 0{,}37\,\Omega$, $l = 1$ m, $d = 0{,}96$ mm, $q = 0{,}729$ mm; $\varepsilon = 0{,}27\,\Omega$, $\varDelta$ (bezogen auf Quecksilber von $0^0 = 1) = 3{,}7$.

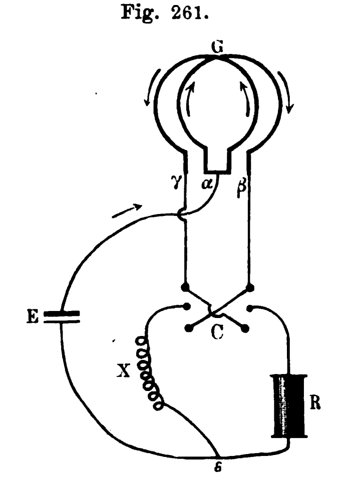
C. Bestimmung mit dem Differentialgalvanometer.

Gebraucht wird: Differentialgalvanometer (Wiedemann'sches oder Quincke'sches Spiegelgalvanometer); Commutator; Widerstände; Rheostat; Element (Vorschaltwiderstand bei einem Galvanometer von 2 Ω innerem Widerstande, ca. 200 Ω).

Princip und Apparat. Ein Differentialgalvanometer ist ein Galvanometer mit zwei Wickelungen, die vom Strome so durchlaufen werden, dass sich die Wirkungen gleicher Ströme in beiden Wickelungen aufheben. Jedes Wiedemann'sche Galvanometer mit verschiebbaren Spulen lässt sich als Differentialgalvanometer schalten.

Der vom Elemente E kommende Strom verzweigt sich bei α durch die beiden parallel geschalteten Galvanometerspulen. Der unbekannte Widerstand X wird hinter die eine, ein Rheostat R hinter die andere Galvanometerspule geschaltet. Bei ε führen die beiden Zweige wieder zusammen zum Elemente. Ein Commutator C gestattet, die Widerstände X und R zu vertauschen.

Fig. 261.



Uebung. 1) Man schaltet zwischen E und α einen passenden Widerstand vor.

2) Man schaltet die Wickelungen des Galvanometers so, dass ihre Wirkungen auf den Magneten entgegengesetzte sind, und verschiebt die Galvanometerspulen oder fügt Windungen zu der einen derselben hinzu, bis das Galvanometer keinen Ausschlag zeigt.

3) Man führt die oben beschriebene Schaltung aus. Man schaltet so lange Widerstand w_1 bei R ein, bis kein Ausschlag am Differentialgalvanometer mehr auftritt. Man commutirt und schaltet soviel w_2 bei R ein, bis wieder der Ausschlag verschwindet.

Dann ist $X = {}^1/_2 \, (w_1 + w_2)$.

Beispiel: $w_1 = 44\,\Omega$, $w_2 = 41\,\Omega$, $X = 42{,}5\,\Omega$.

D. Bestimmung aus Spannungsabfall und Intensität (s. S. 372).

2. Aenderung des Widerstandes der Leiter erster Classe mit der Temperatur.

Gebraucht wird: Zwei Erwärmungskästen, Fig. 262 (einer auf Eisendreifuss), mit Thermometern und Brenner; je zwei Platin- und Nickelindrahtspiralen: Wheatstone'sche Brücke.

Einleitung. Die Leitfähigkeit der Leiter ändert sich mit der Temperatur. Ist k_t die Leitfähigkeit bei t^0, k_0 bei 0^0 und sind α und β Constanten, die für verschiedene Leiter verschiedene Werthe haben, so ist:

$$k_t = k_0 (1 + \alpha t + \beta t^2).$$

Ist β sehr klein, so ist nahezu $k_t = k_0 (1 + \alpha t)$. Aus der Bestimmung von k bei zwei Temperaturen t_1 und t_2 zu k_1 und k_2 erhält man:

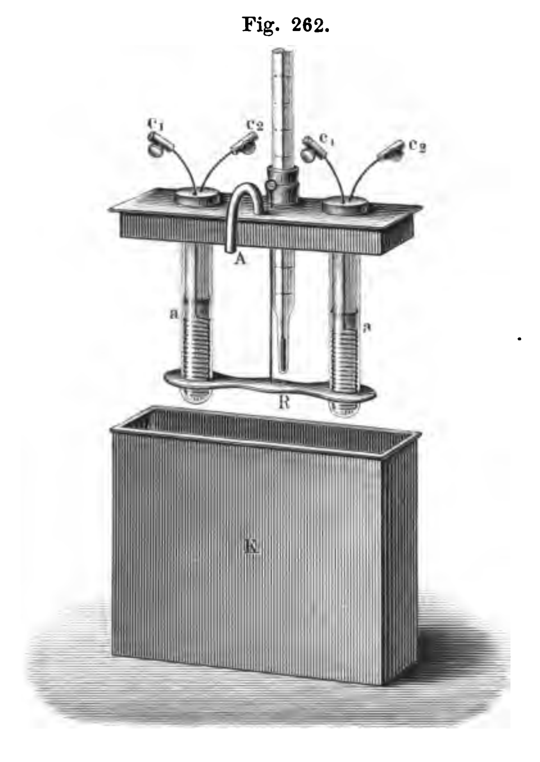
$$\alpha = \left(\frac{k_2}{k_1} - 1\right) \Big/ \left(t_2 - \frac{k_2}{k_1}\, t_1\right)$$

und

$$k_0 = k_1/(1 + \alpha t_1).$$

Für die reinen Metalle hat α einen Werth sehr nahe an 0,00366, also sehr nahe gleich dem Ausdehnungscoëfficienten der Gase.

Fig. 262.



Princip der Methode. Man bestimmt die Widerstände desselben Drahtes w_1 und w_2 bei t_1^0 und t_2^0, dann ist $k_2/k_1 = w_1/w_2$.

Apparat. Um das untere Ende von je einer 15 cm langen, 2 cm dicken Holzspindel a (Fig. 262), welche oben einen breiteren Kopf hat, sind dünne Drähte von Platin und Nickelin gewickelt. Das untere Ende dieser Drähte ist an einen durch die Axe der Spindel gehenden dicken Kupferdraht, das obere an einen solchen, der an der Seite der Holzspindel entlang läuft, angelöthet; die oberen Enden der beiden Kupferdrähte tragen Klemmschrauben c_1

und c_2. Die Holzspindeln sind in mit Oel gefüllte Reagirröhren gesteckt; eine mit Platindraht und eine mit Nickelindraht bewickelte stecken mit ihren Probirröhren in dem Deckel D eines Blechkastens K. In dem Deckel steckt ein Thermometer, ferner ein passend ausgeschnittener Rührer R und ein Abzugsrohr A für die Dämpfe. Zum Erwärmen der Drähte wird der Kasten K, mit Wasser gefüllt, auf einem Eisengestell erhitzt.

Die Widerstandsbestimmungen werden mit der Wheatstone'schen Brücke (S. 376) angestellt.

Uebung. 1) Man füllt die Blechkästen mit Wasser, setzt je eine Platindraht- und eine Nickelindrahtspirale ein, und schaltet dieselben als unbekannten Widerstand in die Wheatstone'sche Drahtcombination.

2) Man liest die Temperatur t_1 ab und bestimmt den Widerstand w_1 für den Platindraht und den entsprechenden w'_1 für den Nickelindraht.

3) Man erwärmt und liest die Temperatur t_2 ab. Man bestimmt w_2 und w'_2 für die beiden Drähte.

4) Man berechnet nach den oben gegebenen Gleichungen α und k_0.

Bemerkung. α ist für Platin weit grösser als für Nickelin. Letzteres ist eine Legirung mit sehr kleinem Aenderungscoëfficienten α; solche Legirungen verwendet man zur Herstellung von Widerstandsetalons.

3. Leitfähigkeit der Elektrolyte.

Gebraucht wird: Galvanometer; zwei Glasrohre von ca. 3,2 cm Weite und 50 cm Länge mit amalgamirten Zn- und Cu-Platten, $ZnSO_4$- und $CuSO_4$-Lösung; Widerstandsgefässe im Wasserbade mit Rührer und Thermometer; kleines Inductorium; mit Filz ausgelegter Kasten; Chromsäureelement; Kohlrausch'sche Brückenwalze oder Wheastone'sche Brücke mit Widerstandskasten; Leitungsdrähte; eine fünfprocentige KCl-Lösung; moleculare und $1/_{10}$ moleculare KCl-Lösung; Pipette von 10 cbcm; Messkolben von 100 und 1000 cbcm Gehalt.

Einleitung. Die specifische Leitfähigkeit $\Lambda = 1/\varepsilon$ von Lösungen ändert sich mit dem Procentgehalte p der gelösten Substanz (p ist die Anzahl Gewichtstheile Salz in 100 Theilen Lösung).

Man kann die Interpolationsformel aufstellen:

$$\Lambda = ap + bp^2 + cp^3 + \cdots$$

Es ist dann für reines Wasser, also für $p = 0$, $\Lambda = 0$ [1]).

Statt p führt man die Anzahl m der Grammäquivalente im Liter der Lösung bei 18^0 ein. Für verdünnte Lösungen gilt die Gleichung

$$\Lambda = \mu' m - \mu'' m^2,$$

wo μ' und μ'' Constanten sind. Die im Liter vorhandenen m Molecüle

[1]) Dies ist sehr angenähert der Fall, möglichst reines Wasser ist ein äusserst schlechter Leiter.

des Salzes bedingen eine durch die Leitfähigkeit $\varLambda$ bestimmte Ueberführung der Elektricität; jedes derselben hat daran einen Antheil $\mu = \varLambda/m = \mu' - \mu'' m$; die Grösse μ heisst die moleculare Leitfähigkeit (Leitvermögen) der Substanz in der betreffenden Lösung. Besonderes Interesse hat der Werth μ_∞, den μ in unendlich verdünnten Lösungen annimmt.

Schaltet man einen Elektrolyten in den Zweig W_x der Wheatstone'schen Combination (Fig. 255) ein, so erhält man nur in speciellen Fällen richtige Werthe der Leitfähigkeiten, da an den Elektroden sich die elektrolytisch ausgeschiedenen Substanzen ansammeln und sei es Polarisationen hervorrufen, sei es einen Uebergangswiderstand erzeugen; dadurch wird der beobachtete Widerstand grösser als der wirkliche.

a) Vorübung.

Princip. Kann durch passende Wahl der Elektroden die Polarisation an denselben vermieden werden, so lässt sich zur Bestimmung der Leitfähigkeit von Flüssigkeiten die Substitutionsmethode (S. 373) verwenden. — Man bestimmt die Aenderung des Widerstandes, die beim Einschalten von Flüssigkeitssäulen entsteht.

Apparat. In ein cylindrisches, verticales, ca. 3,2 cm weites und 50 cm langes Glasrohr ist am unteren Ende mittelst eines Korkes eine kreisförmige Elektrode an einem Kupferdraht eingesetzt, das obere Ende ist durch einen anderen Kork verschlossen, in dem sich eine Glasröhre auf und ab schieben lässt; in dieselbe ist ein Kupferdraht mit Siegellack eingekittet, der am unteren Ende eine Elektrode trägt. Auf dem weiteren Glasrohr sind in Abständen von je 1 cm Marken angebracht. Verwendet werden Röhren mit Zinkvitriol und Zinkelektroden, und solche mit Kupfervitriol und Kupferelektroden.

Uebung. 1) Man stellt die Elektroden nahe an einander und schaltet so viel Widerstand in den Hauptschluss ein, oder im Nebenschluss aus, bis der Ausschlag des Galvanometers (Fig. 239) ca. 45° ist.

2) Man zieht die Elektroden eine bestimmte Strecke l aus einander und schaltet so viel Widerstand w bei R aus, bis der Ausschlag derselbe wie vorher ist.

3) Man misst den inneren Durchmesser A der Röhre und berechnet den Querschnitt q.

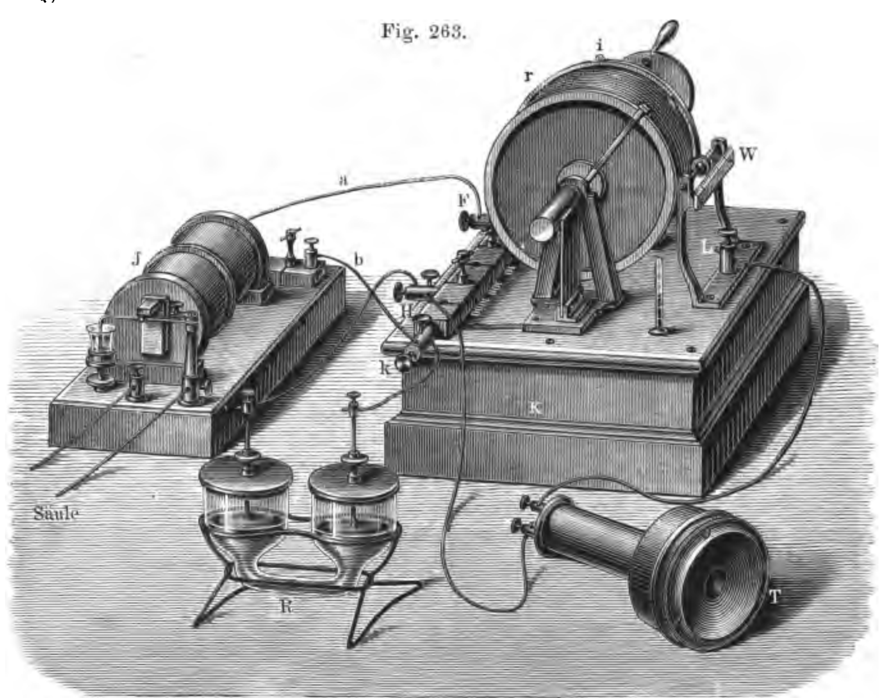
4) Man bestimmt die Dichte d und aus dieser nach der Tabelle 7 den Procentgehalt der Lösung.

Berechnung. Das specifische Leitvermögen ist $\varLambda = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{q \cdot w}{l}$. Da die Dichte d ist, so wiegt ein Liter $d \cdot 1000$ gr. In 100 gr sind nach der Tabelle 7 enthalten p gr Salz, von dem Moleculargewicht M, also p/M Grammmolecüle, im Liter also $10\,p/M$. Das moleculare Leitvermögen wird: $\mu = \varLambda \cdot M/10\,p$.

b) Methode von F. Kohlrausch.

Princip. F. Kohlrausch hat das Auftreten der Polarisation fast vollkommen dadurch vermieden, dass er die alternirenden Ströme (Wechselströme) eines Inductoriums an Stelle der gleichgerichteten Ströme einer galvanischen Kette verwendet; die durch einen ersten Inductionsstrom erzeugte Polarisation wird durch den zweiten, dem ersten entgegengesetzt gerichteten, fast aufgehoben u. s. f. Die abwechselnd gerichteten Ströme lassen sich aber nicht durch ein Galvanometer beob-

Fig. 263.



achten (vergl. S. 360). F. Kohlrausch ersetzt dasselbe durch ein Telephon; sobald durch dasselbe kein Wechselstrom fliesst, hört man keinen Ton.

Man füllt ein Gefäss R (Fig. 263 oder 264), in das zwei platinirte Platinplatten als Elektroden tauchen, mit einer Flüssigkeit, deren specifische Leitfähigkeit Λ_1 bekannt ist (ermittelt durch Messung in einer Flüssigkeitsschicht von bekannter Länge und bekanntem Querschnitt). Der Widerstand der Flüssigkeit im Gefässe R sei w_1. Dann füllt man R mit der Flüssigkeit, deren specifische Leitfähigkeit Λ_2 gefunden werden soll; ihr Widerstand sei w_2. Da bei den Messungen von w_1 und w_2 sich die Dimensionen der Apparate nicht geändert haben, so ist

$$\Lambda_2/\Lambda_1 = w_1/w_2 \quad \text{und} \quad \Lambda_2 = \Lambda_1 . w_1/w_2.$$

Als Flüssigkeit von bekanntem $\varLambda_1$ (als Einheit des Widerstandes ist gesetzt der von Hg bei 0°) zur Auswerthung des Widerstandes w_1, der sogenannten Capacität des Gefässes, kann man z. B. verwenden (t ist die Temperatur):

KCl-Lösung von 5 Proc., Dichte = 1,0308 bei 18°:

$$\varLambda_1 . 10^7 = 64 + 1,3\,(t - 18).$$

Gesättigte Kochsalzlösung (mit 26,4 Proc. NaCl, Dichte = 1,204):

$$\varLambda_1 . 10^7 = 202 + 4,5\,(t - 18).$$

Apparat (Fig. 263). Als Stromquelle dient ein kleines Inductorium (J); man setzt es in einen mit Filz ausgelegten Kasten; als Telephon dient ein Hörtelephon (T); um nicht durch das Geräusch der Umgebung gestört zu werden, steckt man in das andere Ohr Watte.

Der Messdraht der Wheatstone'schen Brücke ist [1]) nach F. Kohlrausch auf einen Marmorcylinder r in 10 Windungen gewickelt. Der verstellbare Contact besteht in einem kleinen, mit einer Rinne versehenen Neusilberrädchen, das sich auf einem horizontalen Neusilberstabe verschiebt und dessen Stellung an einer von 1 bis 10 gehenden Theilung W abgelesen wird; die abgelesene Zahl giebt die Anzahl der ganzen Windungen zwischen dem Anfangspunkte und dem Contacträdchen. Auf dem Rande des Marmorcylinders ist eine Theilung von 0 bis 100 angebracht, welche sich an einem Index i vorbeidreht. Setzt man den Gesammtwiderstand der Neusilberspirale = 1000, so wird bei jeder ganzen Umdrehung ein Widerstand = 100 eingeschaltet, bei jedem Theil einer Umdrehung vom Drahte die beim Index stehende Zahl auf dem Rande der Walze. Steht z. B. das Contacträdchen auf 3, der Index in der Mitte zwischen 76 und 77, so ist eine Drahtlänge 376,5 eingeschaltet und das Verhältniss der Widerstände beider Stücke des Messdrahtes links und rechts von dem Contacträdchen ist 376,5 : 623,5.

Die beiden Enden der secundären Spirale des Inductoriums sind mit den Klemmschrauben k und F verbunden; von k und F führen Drähte zu Metallfedern, die auf den von einander isolirten Enden der Axe des Cylinders schleifen; mit diesen sind durch dicke Kupferdrähte Anfang und Ende des Messdrahtes verbunden. Mit den durch 1000, 100, 10 Ω etc. bezeichneten Messingklötzen sind entsprechende Widerstände ω verbunden, die im Inneren des Kastens K sich befinden.

Der von dem einen Pol der Inductionsspirale ausgehende Strom durchfliesst den Draht a und theilt sich in zwei Zweige, die sich in k wieder vereinigen; von k aus führt der Draht b zum zweiten Pol des

[1]) Man kann auch einen gewöhnlichen Wheatstone'schen Messdraht verwenden.

Inductoriums. Der eine Zweig geht durch den Messdraht, der andere Zweig durch einen bestimmten, durch Ausziehen eines Stöpsels eingeschalteten Widerstand ω und das Widerstandsgefäss R. Die Brücke, in die das Telephon eingeschaltet ist, verbindet die mit dem Contacträdchen verbundene Klemmschraube L und die Klemmschraube H, den Vereinigungspunkt des Widerstandes ω und des Gefässes R.

Die Widerstandsgefässe haben für Flüssigkeiten von mittlerem resp. grossem Widerstande die Gestalt R, Fig. 263, resp. die Gestalt Fig. 264. Die Elektroden E bestehen aus platinirten Platinblechen von mindestens 10 qcm Querschnitt. Man platinirt dieselben, indem man sie in verdünnte Platinchloridlösung taucht, ihnen eine Platinplatte gegenüberstellt und einen Strom hindurch schickt, wobei sie mit dem negativen Pole verbunden sind. Die Enden der mit den Elektroden verbundenen Platindrähte verbindet man mit Klemmschrauben.

Fig. 264.

Uebung 1. Aichen des Gefässes. Man füllt eine 5 proc. KCl-Lösung in das Widerstandsgefäss. Um den Widerstand w_1 derselben zu bestimmen, verfährt man folgendermaassen:

1) Man schaltet durch Ausziehen eines Stöpsels einen bekannten Widerstand ω ein.

2) Man setzt das Inductorium in Gang.

3) Man hält das Telephon an das Ohr und dreht die Walze so lange, bis der Ton verschwindet oder ein Minimum wird. Durch abwechselndes Herankommen an diese Stelle von beiden Seiten, bis man keinen Ton mehr hört, lässt sie sich genauer feststellen.

4) Man liest die Stellung a des Contacträdchens und diejenige des Index ab, dann ist (vergl. S. 377 und Tabelle 22)

$$w_1 : \omega = a : 1000 - a \quad \text{und} \quad w_1 = \omega \, . \, a/(1000 - a).$$

5) Man schaltet statt ω andere bekannte Widerstände, ω_1, $\omega_2 \ldots$, ein und prüft, ob man für w dieselben Werthe erhält.

6) Man führt eine endgültige Bestimmung aus, wobei man so viel Widerstand ω einschaltet, dass das Contacträdchen etwa in der Mitte der Theilung W steht.

Uebung 2. Bestimmung der Leitfähigkeit verschieden concentrirter Lösungen.

Man stellt sich KCl-Lösungen her, die im Liter enthalten:

1) Ein Grammmolecül, also 74,4 gr; 2) $^1/_{10}$ Gr.-Mol.; 3) $^1/_{100}$ Gr.-Mol.; 4) $^1/_{1000}$ Gr.-Mol.; dadurch, dass man 10 cbcm der $^1/_{10}$-Lösung resp. 10 cbcm der $^1/_{100}$-Lösung in einen Kolben von 100 cbcm Inhalt abpipettirt und auf 100 cbcm auffüllt; 5) man füllt diese Lösungen in das bei 1) benutzte Widerstandsgefäss und bestimmt die Widerstände w_2^1,

w_2^{10}, w_2^{100} und w_2^{1000}, daraus ergeben sich die specifischen Leitfähigkeiten $\varDelta_2^1$, $\varDelta_2^{10}$, $\varDelta_2^{100}$ und aus ihnen die molecularen Leitfähigkeiten μ und so fort durch Division mit der Anzahl der im Liter enthaltenen Grammäquivalente.

$$\varDelta_2^1 = \frac{w_1 \varDelta_1}{w_2^1} \text{ und } \mu_1 = \frac{w_1 \varDelta_1}{w_2^1}; \quad \varDelta_2^{10} = \frac{w_1 \varDelta_1}{w_2^{10}} \text{ und } \mu_{10} = 10\, \frac{w_1 \varDelta_1}{w_2^{10}};$$

$$\varDelta_2^{100} = \frac{w_1 \varDelta_1}{w_2^{100}} \text{ und } \mu_{100} = 100\, \frac{w_1 \varDelta_1}{w_2^{100}}; \quad \varDelta_2^{1000} = \frac{w_1 \varDelta_1}{w_2^{1000}} \text{ und}$$

$$\mu_{1000} = 1000\, \frac{w_1 \varDelta_1}{w_2^{1000}}.$$

Aus solchen Messungen ergiebt sich, dass das moleculare Leitvermögen mit der Verdünnung wächst und sich einem Grenzwerth nähert, der bei unendlicher Verdünnung erreicht wird.

Bemerkung. Das zur Herstellung der Lösungen verwendete Wasser muss so rein sein, dass man die Leitfähigkeit desselben vernachlässigen kann.

4. Bestimmung des Widerstandes galvanischer Elemente.

Princip. Man verfährt wie bei der Bestimmung des Widerstandes von Leitern zweiter Classe unter Anwendung des Telephons, welches der constante Strom des Elementes nicht beeinflusst.

Uebung. Man bestimmt den Widerstand:

1) Eines grossen Leclanché'schen Elementes W_1.

2) Eines kleinen Leclanché'schen Elementes w_1.

3) Zweier kleiner hinter einander geschalteter Leclanché'scher Elemente w_2^h.

4) Zweier kleiner neben einander geschalteter Leclanché'scher Elemente w_2^n.

Es ist $W_1 < w_1$, also der Widerstand eines grossen Elementes kleiner als der eines kleinen, $w_2^h = 2\,w_1$, also der Widerstand zweier hinter einander geschalteter doppelt so gross als der eines einzigen, $w_2^n = {}^1/_2\, w_1$, also der Widerstand zweier neben einander geschalteter halb so gross als der eines einzigen (vgl. S. 351).

Allgemeines.

Das moleculare Leitvermögen μ wächst, sobald die Verdünnung eine gewisse Grenze überschritten hat, mit zunehmender Verdünnung, erst langsam, dann schneller und dann wieder langsam und nähert sich mehr und mehr asymptotisch einem Grenzwerthe μ_∞. Die Curve, welche die Beziehung zwischen μ und der Concentration darstellt, besitzt also einen Inflexionspunkt.

Bei grossen Concentrationen treten bei einzelnen Substanzen, Schwefelsäure etc., Maxima und Minima des Leitvermögens ein.

Nach dem Ohm'schen Gesetze ist:

$$i = \frac{E}{W} \quad \text{und} \quad W = \frac{1}{\varDelta}\frac{l}{q} \text{(vergl. S. 349)},$$

also

$$i = \varDelta . \frac{q}{l} E \quad \text{und} \quad \varDelta = \frac{i}{E}\frac{l}{q}.$$

Das Leitvermögen ist also gleich derjenigen Stromstärke, welche die elektromotorische Kraft Eins in einem Leiter von der Länge Eins und dem Querschnitt Eins erzeugt.

Nach der oben angeführten Theorie (S. 172) von Arrhenius und Ostwald (s. auch am Schlusse von Allgemeines) sind die Molecüle der Salze in Lösungen, die mithin von vornherein zum Theil oder ganz in ihre Ionen zerfallen, und werden nicht erst durch den Strom in dieselben zerlegt. Die Stromleitung besteht darin, dass unter dem Einflusse der an jeder Stelle vorhandenen elektromotorischen Kraft die positiven Ionen im einen, die negativen Ionen im anderen Sinne fortgeführt werden. Die durch die Querschnittseinheit geführte Elektricitätsmenge ist proportional der Zahl der dissociirten Molecüle, die in der Volumeneinheit der Lösung enthalten sind, und der Summe der Geschwindigkeiten U und V der beiden Ionen.

Eine Lösung möge in v Leitern ein Grammmolecül enthalten, dann ist das moleculare Leitvermögen

$$\mu_v = (U + V) . m,$$

wo m den Bruchtheil dissociirter Molecüle, den Dissociationsgrad, bezeichnet.

Mit zunehmender Verdünnung werden immer mehr Molecüle dissociirt, bis in unendlich verdünnten Lösungen alle Molecüle zerfallen sind, dann ist $m = 1$ und

$$\mu_\infty = U + V.$$

Für irgend eine Lösung ist also der Dissociationsgrad $m = \mu / \mu_\infty$, d. h. der Dissociationsgrad einer Lösung von der Verdünnung v ist gleich dem Verhältnisse der molecularen Leitfähigkeit dieser Lösung zu der molecularen Leitfähigkeit einer unendlich verdünnten Lösung.

In vielen Fällen hängt der Dissociationsgrad in einfacher, auch theoretisch ableitbarer Weise von der Concentration ab. Es ist

$$\frac{m^2}{v\,(1 - m)} = K,$$

wo K eine Constante ist. Der durch diese Gleichung ausgedrückten Beziehung zwischen Dissociationsgrad und Verdünnungen entspricht

auch die oben erwähnte Beziehung zwischen molecularer Leitfähigkeit und Verdünnung.

Die Grösse K hat je nach der Art der Substanzen verschiedene Werthe. Bei schwachen Säuren und Basen (Essigsäure, Aethylamin etc.) ist sie klein, sie wächst, wenn aus Essigsäure durch Eintritt des elektronegativen Chloratoms Monochlor-, Dichlor- und Trichloressigsäure entsteht, dabei nimmt auch der Säurecharakter zu. Bei starken Säuren und Basen (wie HCl, KOH etc.) ist K gross.

Von F. Kohlrausch sind die Geschwindigkeiten U und V aus dem Leitvermögen berechnet worden. Beträgt die elektromotorische Kraft auf 1 cm 1 Volt, so ist:

$U\,10^5$ cm/sec. H : 330, K : 66, Na : 45, Li : 36, NH_4 : 66, Ag : 57,
$V\,10^5$ cm/sec. OH : 181, Cl : 69, Br : 68, J : 68, NO_3 : 64, $^1/_2\,SO_4$: 73.

Bei dieser Gelegenheit möge kurz noch einmal die Arrhenius'sche Theorie wiedergegeben und die Thatsachen, welche sich aus ihr erklären, zusammengestellt werden; dabei fassen wir der Einfachheit wegen nur den Fall zweiatomiger Salze, die aus einwerthigen Ionen bestehen, ins Auge.

1. Nach Arrhenius zerfallen Elektrolyte in Lösungsmitteln, in welchen sie leiten, in ihre Ionen, und zwar ist in verschiedenen Lösungsmitteln im Allgemeinen der Dissociationsgrad um so grösser, je besser die Lösung leitet. In demselben Lösungsmittel wächst der Dissociationsgrad mit der Verdünnung. Alle Nichtelektrolyte zerfallen nicht in Ionen.

2. Elektrolyte leiten schon bei den kleinsten elektromotorischen Kräften, der Strom leistet also keine Arbeit, um die Molecüle zu zerspalten (darauf wies schon Clausius hin und gründete darauf eine mit der Arrhenius'schen nahe verwandte Anschauung).

3. Gelöste Elektrolyte erniedrigen bei gleicher molecularer Concentration den Gefrierpunkt und erhöhen den Siedepunkt doppelt so stark, als gelöste Nichtelektrolyte; die Lösungen enthalten also im ersten Falle doppelt so viel getrennte Theile, als im zweiten.

4. Die elektrolytische Leitfähigkeit lässt sich in sehr verdünnten Lösungen durch Addition der für die beiden Ionen ermittelten Geschwindigkeiten berechnen.

5. Die Neutralisationswärmen von verdünnten Säuren und Basen haben, unabhängig von der Natur derselben, den gleichen Werth.

6. Die Volumenänderungen bei der Neutralisation lassen sich aus der Theorie im Voraus berechnen.

7. Aus den Geschwindigkeiten von Reactionen, an denen hauptsächlich die Ionen betheiligt sind, und aus den Leitfähigkeiten berechnet sich für K (vergl. oben) derselbe Werth.

8. und 9. In sehr verdünnten Lösungen haben verschiedene Salze mit einem gleichen absorbirenden resp. einem gleichen drehenden Bestandtheile, der ein Ion ist, für dieses Ion gleiche Absorptionscoëfficienten und gleiche moleculare Drehungen.

10. Der Verlauf vieler chemischer Reactionen leitet sich aus der obigen Theorie ab; so ist z. B. $AgNO_3$ ein Reagens nur auf das Chlorion und nicht auf Chlor überhaupt, es fällt daher wohl aus Lösungen von Chloriden $AgCl$ aus, nicht aber aus Chloroform, Chlorsäure etc.

11. In verdünnten Lösungen sind ausser den oben erwähnten Eigenschaften noch viele andere additiv, d. h. sie stellen sich als Summe zweier Grössen dar, von denen die eine dem einen, die andere dem anderen Ion zukommt.

IV. Elektromotorische Kraft.

1. Bestimmung der elektromotorischen Kraft mit dem Elektrometer.

Gebraucht wird: **Commutator auf isolirenden Säulen; Capillarelektrometer; Widerstandskasten; Glasröhre mit zwei Ansätzen und Kupferelektroden (vergl. S. 392); Verbindungsdrähte; Quadrantelektrometer; vielpaarige Säule aus kleinen Accumulatoren; ein Latimer Clark-, Daniell-, ein grosses Leclanché- und zwei kleine Leclanché-Elemente; Chromsäure-Element; Verbindungsdrähte.**

A. Bestimmungen mit dem Quadrantelektrometer.

Princip. Ueber den vier quadrantenförmigen Metallplatten $a_1\,a_2$, $b_1\,b_2$, Fig. 265, von denen a_1 und a_2, b_1 und b_2 mit einander verbunden sind, hängt das lemniscatenförmige Metallblech A, die „Nadel". A wird mit dem einen Pole einer vielpaarigen Säule verbunden, etwa dem positiven, während der negative zur Erde abgeleitet ist; a_1 und a_2 werden mit dem einen, etwa dem positiven, b_1 und b_2 mit dem anderen, dem negativen Pole der zu untersuchenden Kette verbunden, dann dreht sich A so, dass seine Längsaxe über b_1 und b_2 liegt. Gleichgewicht tritt ein, wenn die durch die Drehung bei unifilarer Aufhängung der Nadel entwickelte Torsionskraft, bei bifilarer, wenn die durch die Schwere bedingte rücktreibende Kraft und die Torsion der Aufhängefäden den elektrischen Kräften das Gleichgewicht hält. Die Grösse der Drehung ist nahe proportional den auf $a_1\,a_2$, $b_1\,b_2$ befindlichen Elektricitätsmengen, also nahe proportional der elektromotorischen Kraft der untersuchten Kette.

Fig. 265.

Apparat. Auf einem Messingdreifuss dreht sich eine Messingplatte, auf der drei Messingsäulen eine ebene Messingplatte tragen. An der unteren Platte sind auf Glasfüssen die vier Quadranten angebracht, von denen je zwei gegenüberliegende mit einander verbunden sind (der eine ist in Fig. 266 fortgenommen), zwischen denen die Nadel hängt. An ihrer unteren Seite ist ein Draht befestigt, dessen unteres Ende zu einem in ein Gefäss mit Schwefelsäure tauchenden Ring umgebogen ist. Dies Gefäss steht in einem zweiten, um das Ueberlaufen der Schwefel-

säure, wenn sie Wasser anzieht, zu verhindern. Durch den Deckel gehen frei durch kleine Löcher, ohne den Deckel zu berühren, die zu den Quadranten I und II und der Schwefelsäure III führenden Drähte.

Fig. 266.



Eine auf den Deckel und die Bodenplatte aufgeschliffene (in der Figur nicht gezeichnete) Blechtrommel dient zum Bedecken des Apparates. Der in der Mitte durchbohrte Deckel trägt die Vorrichtung zum Aufhängen der Nadel. Die Glasröhre trägt eine Fassung *O*, in der sich ein Messingstab verschieben und durch eine Schraube feststellen lässt. Der Stab ist unten aufgeschlitzt und conisch verjüngt. Seine beiden Hälften tragen dort zwei kleine Löcher, in welche die Enden eines Coconfadens gebunden werden, in dessen Mitte der zu einem Haken gebogene Draht, welcher die Nadel trägt, eingehängt ist. Der Stab ist axial durchbohrt, die Durchbohrung verläuft unten conisch. Durch Einschrauben eines unten halbkugelförmigen Metallstabes *S* kann man die Löcher am unteren Ende von einander entfernen und dadurch den Abstand der Coconfädenverändern, wodurch die Empfindlichkeit eine andere wird. Vor dem Spiegel, der an dem die Nadel tragenden Drahte befestigt ist und der in der Hülse *H* schwebt, ist ein Fernrohr mit Scala aufgestellt.

Uebung. 1) Man stellt das Fernrohr senkrecht zum Spiegel (s. S. 22).

2) Man verbindet die Nadel erst mit dem positiven Pole der vielpaarigen Säule und dann mit dem negativen; sind die Ausschläge nicht gleich, so dreht man die Nadel mit der Glasröhre so lange, bis dieselben gleich sind.

3) Man verbindet $a_1 a_2$ mit dem einen Pole einer isolirten Normalkette, etwa eines Latimer Clark-Elementes von der elektromotorischen Kraft E_1, der Ausschlag sei $+ \alpha'_1$. Man legt den Commutator um, der Ausschlag sei $- \alpha''_1$.

4) Man verbindet $a_1 a_2$ mit dem einen Pole der zu untersuchenden Kette von der elektromotorischen Kraft E_2, der Ausschlag sei α_2, dann ist

$$E_2 : E_1 = \alpha_2 : \alpha_1.$$

5) Man verbindet $a_1 a_2$ mit dem anderen Pole der untersuchten Kette und überzeugt sich, dass der Ausschlag denselben Werth wie oben hat, aber nach der entgegengesetzten Richtung liegt.

6) Man leitet den unverbundenen Pol zur Erde ab, dann steigt der Ausschlag, also auch die Spannung an dem mit dem Elektrometer verbundenen Pole auf die doppelte Höhe.

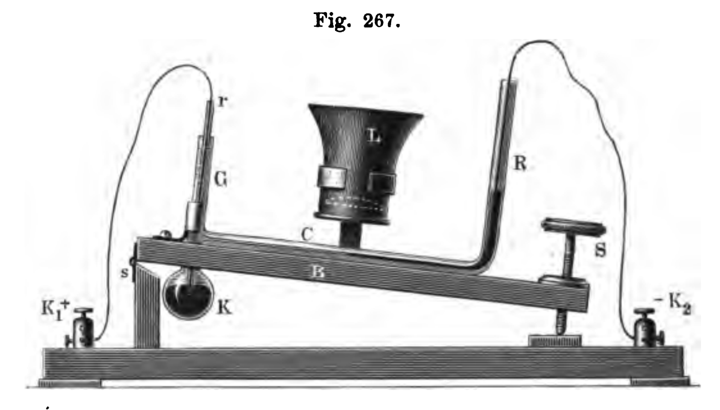
B. Bestimmungen mit dem Capillarelektrometer.

Princip. Die Oberflächenspannung (S. 120) des mit einem Elektrolyten, z. B. verdünnter Schwefelsäure, in Berührung stehenden Quecksilbers ändert sich, wenn die an der Berührungsstelle bestehende Potentialdifferenz irgendwie geändert wird. Schaltet man zwischen zwei Quecksilberelektroden von verschiedenem Querschnitte eine Säule von Schwefelsäure ein, so vertheilt sich die Wirkung einer äusseren elektromotorischen Kraft im Verhältniss der Grösse der Berührungsflächen. Ist die eine sehr gross, die andere aber klein, berühren sich z. B. auf der einen Seite die beiden genannten flüssigen Leiter innerhalb einer Capillare, so kommt die Wirkung wesentlich nur hier zur Geltung, das Ende des Quecksilberfadens verschiebt sich innerhalb der Capillaren. Diese Erscheinung benutzte Lippmann zur Construction des sehr empfindlichen Capillarelektrometers.

Apparat (Ostwald'sche Form) Fig. 267. Auf einem um ein Scharnier s beweglichen Brettchen B, dem man durch die Stellschraube S verschiedene Neigungen gegen die Horizontale geben kann, ist der kleine Glasapparat $GKCR$ befestigt. C ist eine etwa $^1/_2$ mm weite Capillare, welche das unten mit einer Kugel K versehene Glasrohr G mit dem weiteren Rohre R verbindet. K und R ist zum Theil mit reinem Quecksilber gefüllt, das in C bis etwa zur Mitte vordringt. Der übrige Theil von R, K und G ist mit Schwefelsäure (im Verhältniss von 1 : 6 verdünnt) angefüllt. In G steht ein engeres Glasrohr r, in das unten ein Platindraht eingeschmolzen ist, der oben an einen mit der Klemme K_1 in Verbindung stehenden Kupferdraht angelöthet ist; er theilt der Quecksilbermasse in K die auf K_1 wirkende Spannung mit. Ein ähnlicher, aber nicht durch ein Glasrohr geschützter, von K_2 kommender Draht taucht in R ein. Wird an $K_1 K_2$ eine

Potentialdifferenz so angeschaltet, dass K_2 negativ wird, so verschiebt sich in Folge der Wasserstoffpolarisation der Quecksilbermeniscus in C. Die Grösse der Verschiebung wird mittelst der Lupe L an einer unter C liegenden Scala gemessen. Je steiler B gestellt wird, um so unempfindlicher ist das Instrument; ausser Gebrauch wird es durch einen K_1 und K_2 direct verbindenden Kupferdraht in sich kurz geschlossen; vor dem Gebrauche werden durch Heben des Brettchens B einige Tropfen Quecksilber aus C nach K hinübergegossen, damit ein völlig reiner

Fig. 267.



Meniscus zur Verfügung steht. Das Instrument lässt bei geeigneter Einstellung an S leicht die Millivolts direct messen; über 1 Volt darf es indessen nur in Ausnahmefällen in Anspruch genommen werden. Am besten benutzt man es als sogenanntes Nullinstrument bei der im Folgenden zu beschreibenden Compensationsmethode, wo es dann die bei der Compensation noch übrig bleibenden kleinen Spannungsdifferenzen sehr genau zu messen gestattet.

Uebung 1. Aichung des Capillarelektrometers. 1) Ein Element von bekannter elektromotorischer Kraft, z. B. das Normaldaniell (S. 354), vereinigt man unter Zwischenschaltung eines Unterbrechers mit einem grossen Widerstande W (über 1000 Ω) eines geaichten Stöpselrheostaten zu einem geschlossenen Kreise. Dann vertheilt sich der ganze Spannungsabfall E auf den eingeschalteten Widerstand W (vergl. S. 395).

Durch besondere Stöpsel (Laufstöpsel) oder in anderer Weise verbindet man die Enden von kleinen Widerständen w des Widerstandskastens mit K_1 und K_2, die auf das Elektrometer entfallende Potentialdifferenz ist dann Ew / W Volt; die Meniscusverschiebung sei α_1.

3) Man zweigt zwischen $2w$, $3w$, ... nw ab; Verschiebung: α_2, α_3, ... α_n.

Man findet, dass bis zu Potentialen von 0,1 Volt $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 \ldots : \alpha_n$

$= 1:2:3:\ldots:n$ ist, die Ausschläge also proportional den wirkenden Spannungen sind.

Ein Scalentheil entspricht $\frac{Enw}{\alpha_n W}$ Volts.

Uebung 2. Bestimmung der elektromotorischen Kraft von Concentrationsketten. 1) Ein vertical gestelltes Glasrohr ist unten und oben durch einen, je einen Kupferstab tragenden Gummistopfen geschlossen. In die untere Hälfte füllt man durch ein seitliches Rohr eine concentrirte Kupfersulfatlösung ein. Nach Schliessen der Oeffnung füllt man durch ein an der oberen Rohrhälfte angeschmolzenes Seitenrohr über diese concentrirte Lösung vorsichtig (so dass kein Vermischen eintritt) eine verdünnte Kupfersulfatlösung.

2) Man bestimmt die elektromotorische Kraft dieses „Concentrationselementes". Durch die sich längere Zeit erhaltende Trennungsschicht der verschieden concentrirten Lösungen wandern fortwährend Cu-Ionen von der concentrirteren zur verdünnteren Lösung. Die elektromotorische Kraft des Elementes dauert so lange an, als sich die Ionenwanderung vollzieht, d. h. so lange ein Concentrationsgefälle vorhanden ist.

2. Bestimmung durch Vergleichung mittelst des Galvanometers nach Fechner.

Gebraucht wird: Empfindliches Galvanometer; Rheostat; Daniell-, Chromsäure-, verschiedene Leclanché-Elemente; Unterbrecher; Verbindungsdrähte.

Princip. Man bildet einen Schliessungskreis aus einem Elemente von der elektromotorischen Kraft E_1 und dem inneren Widerstande w_1, aus einem Rheostaten und einem empfindlichen Galvanometer, deren Widerstand mit dem der Leitungsdrähte W sei, und beobachtet die Stromstärke i_1 in diesem Kreise; hierauf ersetzt man das erste Element durch ein zweites von der elektromotorischen Kraft E_2 und dem inneren Widerstande w_2 und beobachtet die Stromstärke i_2, dann ist

$$i_1 = \frac{E_1}{w_1 + W} \quad \text{und} \quad i_2 = \frac{E_2}{w_2 + W}.$$

Ist der äussere Widerstand W so gross im Vergleich zu den Widerständen in den Elementen w_1 und w_2, dass man die letzteren gegen den ersteren vernachlässigen kann, so ist:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{i\,(w_1 + W)}{i_2\,(w_2 + W)} = \frac{i_1}{i_2};$$

die elektromotorischen Kräfte der beiden Elemente verhalten sich wie die am Galvanometer beobachteten Stromstärken, die selbst wieder

den Ausschlägen des Galvanometers α_1 und α_2 nahezu proportional sind. Es ist

$$E_1 : E_2 = \alpha_1 : \alpha_2.$$

Damit trotz der Grösse der eingeschalteten Widerstände der Ausschlag nicht zu klein ist, muss das Galvanometer empfindlich sein.

Uebung. 1) Man stellt ein passendes Galvanometer auf.

2) Man schaltet einen Rheostaten, ein Daniell-Element (elektromotorische Kraft $= E_1$) und einen Unterbrecher ein und schliesst den Strom.

3) Man ändert den Widerstand des Rheostaten, bis der Ausschlag eine passende Grösse α_1 annimmt.

4) Man schaltet ein Chromsäureelement ein. Ausschlag α_2.

5) Man schaltet ein grosses Leclanché-Element ein. Ausschlag α_3.

6) Man schaltet ein kleines Leclanché-Element ein. Ausschlag α_4.

7) Man schaltet zwei Leclanché-Elemente hinter einander ein. Ausschlag α_5.

8) Man schaltet zwei Leclanché-Elemente neben einander ein. Ausschlag α_6.

Man berechnet die elektromotorischen Kräfte für die obigen Elemente. Die Resultate für dieselben sind die gleichen wie S. 398.

Diese Methode ist wegen der Polarisation im Elemente nicht sehr genau.

3. Bestimmung nach dem Compensationsverfahren von Du Bois-Reymond.

Gebraucht wird: Langer Constantandraht mit Schleifcontact; Galvanometer oder Capillarelektrometer; Commutator; Zuleitungsdrähte; Zusatzwiderstand; Elemente.

Princip. Schliessen wir eine Kette ZK von der elektromotorischen Kraft E (Fig. 268, a. f. S.) in einen Kreis $EBCS$ (wir denken uns zunächst den Theil $BE_1\,GC$ fort), und ist der gesammte Widerstand des Schliessungskreises W, so ist der Abfall der Spannung auf der Widerstandseinheit E/W. Besteht die Schliessung aus beliebigen Leitern, deren Widerstand plus dem inneren der Kette w_1 ist, und einem dünnen Draht BS von der Länge l und dem Widerstande w, so dass $W = w_1 + w$, so ist der Unterschied der Spannungen an den beiden Enden des Drahtes

$$E \,.\, w/(w_1 + w) = \Delta.$$

Wir wollen E so gross annehmen und w so gross im Verhältniss zu W, dass der Abfall Δ wenigstens 3 Volt beträgt. Der Abfall der Spannung auf der Längeneinheit des Drahtes ist

$$\Delta/l$$

auf einer Strecke $BC = r$

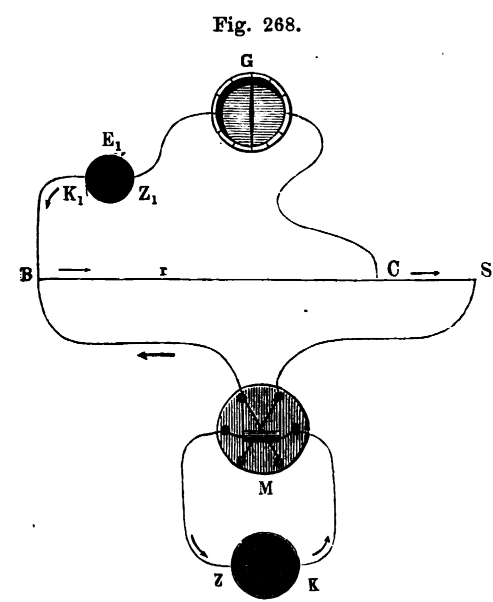
$$\Delta_r = r \,.\, \Delta/l.$$

Bei einem Elemente E_1 sei der Unterschied der Spannungen an den beiden Polen, wenn dasselbe offen ist, E_1; bringen wir dieselben durch Drähte mit Stellen B und C des Drahtes BS in Berührung, zwischen denen derselbe Spannungsunterschied $\Delta_1 = E_1$ vorhanden ist, sie mögen um r_1 von einander abstehen, so kann durch das Element kein Strom fliessen. Ein mit demselben in den Zweig BE_1C eingeschaltetes Galvanometer G oder Capillarelektrometer zeigt keinen Ausschlag. Dann ist

$$E_1 = \Delta_1 = \Delta \,.\, r_1/l.$$

Um aus dieser Gleichung E_1 zu erhalten, müsste man w, w_1, E kennen. Man schaltet daher nach dem zu untersuchenden Elemente E_1 ein Normalelement E_2 an Stelle von E_1 ein und erhält

Fig. 268.



$$E_2 = \Delta_2 = \Delta \,.\, r_2/l$$

und

$$E_1/E_2 = r_1/r_2,$$
$$E_1 = E_2 \,.\, r_1/r_2.$$

Das Verhältniss der elektromotorischen Kräfte ist gleich dem Verhältniss der auf dem Drahte BS eingeschalteten Längen, bei denen kein Strom durch das Galvanometer oder Elektrometer fliesst.

Tritt bei keiner Lage des Punktes C auf dem Drahte BS kein Ausschlag des Galvanometers oder Elektrometers ein, so ist der Spannungsabfall auf BS kleiner als die zu messende elektromotorische Kraft, die elektromotorische Kraft der Kette E_1 resp. der Widerstand des Drahtes BS ist zu klein. In diesem Falle wird mit B das eine Ende eines Drahtes verbunden, zu dessen anderem Ende die von E und E_1 kommenden Drähte führen; dadurch ist also der Draht BS gleichsam verlängert worden.

Ist x das Verhältniss des bei B vorgeschalteten Widerstandes zu dem Widerstande des gesammten Messdrahtes, so entspricht er einer Länge $\lambda = xl$ des letzteren. Sind die Ketten E_2 und E_3 compensirt, wenn auf den Messdraht die Längen ϱ_1 und ϱ_2 abgegrenzt sind, so ist

$$E_1/E_2 = (\lambda + \varrho_1)/(\lambda + \varrho_2)$$

und

$$E_1 = E_2 \,.\, (\lambda + \varrho_1)/(\lambda + \varrho_2).$$

Apparat. Das Schema der Anordnung stellt die Fig. 268 dar; BS ist der Messdraht, der am besten aus Constantan besteht; der Schleifcontact bei C besteht z. B. aus einem kleinen, mit einer Vertiefung versehenen Schlitten, in der ein Tropfen Quecksilber den Contact mit dem Drahte dauernd herstellt. M ist ein Commutator. Der bei B eventuell vorzuschaltende Widerstand ist auf einem Brette in Zickzacklinien ausgespannt.

Uebung 1. Bestimmung der elektromotorischen Kraft eines Leclanché-Elementes.

1) Man verbindet drei bis vier Bunsen- oder Daniell-Elemente oder Accumulatoren hinter einander und schaltet sie an Stelle von E ein.

2) Man schliesst die Kette, hält einen der Leitungsdrähte über eine Magnetnadel und bestimmt die Richtung des Stromes nach der Ampère'schen Regel. Man öffnet den Strom und verbindet den + Pol mit dem Ende B des Drahtes BS, der dem Anfange der Millimetertheilung auf dem Maassstabe entspricht, den — Pol mit dem anderen Ende.

3) Man verbindet mit dem Ende B den + Pol eines Normalelementes (Daniell), der — Pol wird durch ein Galvanometer und einen langen Draht mit dem Schleifcontact C verbunden.

4) Man schliesst den Hauptstrom, verschiebt den Schleifcontact, bis das Galvanometer oder Capillarelektrometer bei Stromschluss keinen Ausschlag zeigt; die Lage des Schleifcontactes sei r_D.

5) Man ersetzt das Daniell'sche Element durch ein kleines Leclanché und verfährt ebenso; die Lage des Schleifcontactes sei r_L, dann ist $E_L / E_D = r_L / r_D$.

Uebung 1a. Bestimmung der elektromotorischen Kraft, wenn bei keiner Lage von C das Galvanometer oder Capillarelektrometer in Ruhe bleibt.

1) Man schaltet vor B einen solchen Widerstand, dass bei einer bestimmten Lage von C etwa in der Mitte von BS das Galvanometer oder Capillarelektrometer bei G in Ruhe bleibt.

2) Man bestimmt in der S. 376 angegebenen Weise: a) den Widerstand des Drahtes $BS = w_1$, b) den Widerstand des Zusatzdrahtes w_2, indem man beide der Reihe nach als die unbekannten Widerstände in die Wheatstone'sche Drahtcombination einschaltet.

3) Die übrigen Messungen gestalten sich wie bei Uebung 1, die Berechnung, wie oben angegeben.

Uebung 2. Bestimmung der elektromotorischen Kraft verschiedener Elemente. 1) Man ersetzt das kleine Leclanché-Element durch ein grosses, die Lage des Schleifcontactes bleibt fast dieselbe, also auch die elektromotorische Kraft; die elektromotorische Kraft ist unabhängig von der Grösse der Elemente.

2) Man bestimmt für ein zweites kleines Leclanché die elektromotorische Kraft, dieselbe ist gleich der des ersten.

3) Man schaltet die beiden Leclanchés hinter einander, die elektromotorische Kraft ist die doppelte von der eines einzigen Elementes.

4) Man schaltet die beiden Leclanchés neben einander, die elektromotorische Kraft ist gleich der eines einzigen.

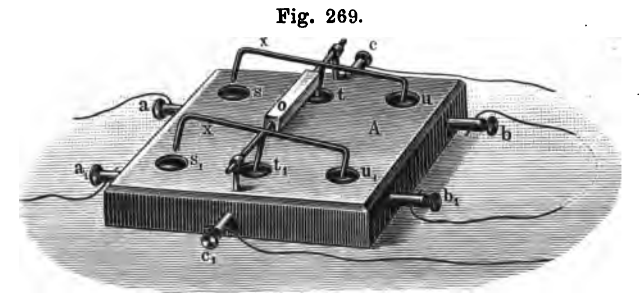
Beispiele:	r	Daniells	Volts
Daniell	33 cm	1,00	1,10
Grosses Leclanché	40 „	1,21	1,33
Kleines „ a)	41 „	1,24	1,36
Kleines „ b)	40 „	1,21	1,33
Zwei Leclanchés hinter einander	80 „	2,43	2,67
„ „ neben einander	40 „	1,21	1,33
Chromsäureelement anfangs	60 „	1,82	2,00

Nach 5, 15 Min., $r = 53, 50$, $E = 1{,}606, 1{,}502$ Dan. $= 1{,}77, 1{,}65$ Volt.

Uebung 3. Aenderung der elektromotorischen Kraft mit der Zeit.

Apparat. Die in das Holzbrett A (Fig. 269) gebohrten sechs Näpfe stu und $s_1 t_1 u_1$ stehen mit den Klemmen acb und $a_1 c_1 b_1$ in

Fig. 269.



Verbindung; in dieselben können die entsprechenden Spitzen der beiden Bügel x und x tauchen, welche durch das isolirende Elfenbeinstück o mit einander verbunden sind und sich mit demselben um eine horizontale Axe drehen. Mit c und c_1 verbindet man die Pole des Elementes, a und a_1 verbindet man durch einen beliebigen, nicht zu grossen Widerstand unter Einschaltung des Kohlrausch'schen Federgalvanometers, Fig. 249. Von b und b_1 wird die eine mit dem Anfange des Messdrahtes, die andere mit dem Schleifcontact an demselben verbunden.

Die Lage, wie sie die Figur angiebt, hat die Wippe, wenn man die elektromotorische Kraft bestimmen will, die entgegengesetzte, wenn man das Element in sich schliesst.

Uebung. 1) Man bestimmt die elektromotorische Kraft eines „inconstanten" Elementes, z. B. eines Leclanché- oder Chromsäureelementes.

2) Man legt den Bügel o so, dass das Element in sich geschlossen ist; das Galvanometer zeigt, wie die Stromstärke abnimmt.

3) Man legt die Wippe um und bestimmt die elektromotorische Kraft; dieselbe ist kleiner als vorher.

4) Man hebt den Schleifcontact auf und bestimmt nach einiger Zeit wieder die elektromotorische Kraft; sie ist wieder grösser geworden.

Bemerkung. In einem inconstanten geschlossenen Element nimmt also mit der Zeit die elektromotorische Kraft ab. Wird dasselbe eine Zeit lang geöffnet, so steigt sie wieder an; der Grund hierfür liegt in den sich in dem geschlossenen Element abspielenden Polarisationsvorgängen (s. bei Elektrolyse).

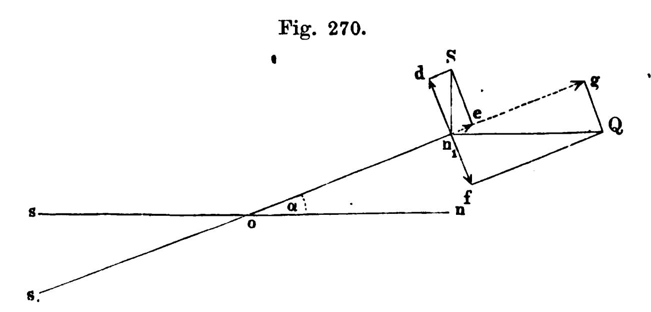
V. Tangentenbussole und Spiegelgalvanometer.

1. Tangentenbussole.

Gebraucht wird: Tangentenbussole; Knallgasvoltameter; Rheostat; Batterie von etwa 6 bis 8 Volt Klemmenspannung; Unterbrecher; Leitungsdrähte.

Princip. Fliesst oberhalb einer Magnetnadel sn (Fig. 270) parallel zu derselben in einer geradlinigen Bahn ein Strom von der Intensität i, so wirken auf die Pole der Magnetnadel, deren Polstärke $\pm\mu$ ist, zwei Kräfte. Die erste A rührt von der Wirkung der horizontalen Componente H des Erdmagnetismus (s. w. unten) her, $n_1\,Q$ in der Figur; sie ist proportional der Polstärke μ der Nadel und der horizon-

Fig. 270.



talen Componente H des Erdmagnetismus, d. h. wenn c eine Constante ist: $A = c\mu H$. Die zweite B rührt her von der elektromagnetischen Wirkung des Stromes auf die Magnetnadel; sie steht senkrecht auf der Stromesrichtung und ist proportional der Polstärke μ und der Stromintensität i, also wenn c_1 eine andere Constante bedeutet: $B = n_1\,S = c_1\,\mu\,i$.

Die Magnetnadel wird um einen Winkel α gedreht, bis die senkrecht zu ihrer Richtung stehende Componente von $A = n_1\,Q$, also $n_1 f = A\,.\,\sin\alpha$, gleich ist der entsprechenden Componente von $B = n_1\,S$, also $n_1\,d = B\,.\,\cos\alpha$. Dann ist: $c\,\mu\,H\,.\,\sin\alpha = c_1\,\mu\,i\,.\,\cos\alpha$,

$$i = c/c_1\;H\operatorname{tg}\alpha = K\operatorname{tg}\alpha.$$

$K = H\,.\,c/c_1$ heisst der Reductionsfactor der Tangentenbussole.

Aendert sich die Grösse der Horizontalcomponente des Erdmagnetismus nicht, so ist die Intensität des Stromes proportional der Tangente des Ablenkungswinkels der Magnetnadel.

Apparat. Die Tangentenbussole, ein Galvanometer, besteht aus einem kupfernen Ringe *o*, der an seinen unteren Fortsätzen *a* und *c* zwei Klemmschrauben *b* und *d* trägt. In der Mitte des Ringes ruht auf einer Spitze eine kurze Magnetnadel. Mit ihr ist ein Zeiger aus Glas oder Aluminium verbunden, dessen Enden über einer Theilung schweben. Unter der Magnetnadel und ihren Fortsätzen ist ein horizontaler Spiegel befestigt. Man liest in der Weise ab, dass das Spiegelbild des Zeigers sich mit dem Zeiger selbst deckt. Dann blickt man senkrecht auf die Theilung (vergl. S. 56). Der Ring *o* ist drehbar; man stellt ihn so, dass seine Ebene in die Richtung der Nadel fällt, wenn kein Strom durch ihn geht. Zur Bestimmung der Nulllage visirt man durch das Loch bei *o*.

Fig. 271.



Man kann auch die Nadel an einem Faden aufhängen, mit einem Spiegel verbinden und mit Fernrohr und Scala ablesen.

Aichung der Tangentenbussole. Um mit der Tangentenbussole absolute Messungen auszuführen, muss man die Constante K bestimmen; sie hängt ab von der Grösse der horizontalen Componente

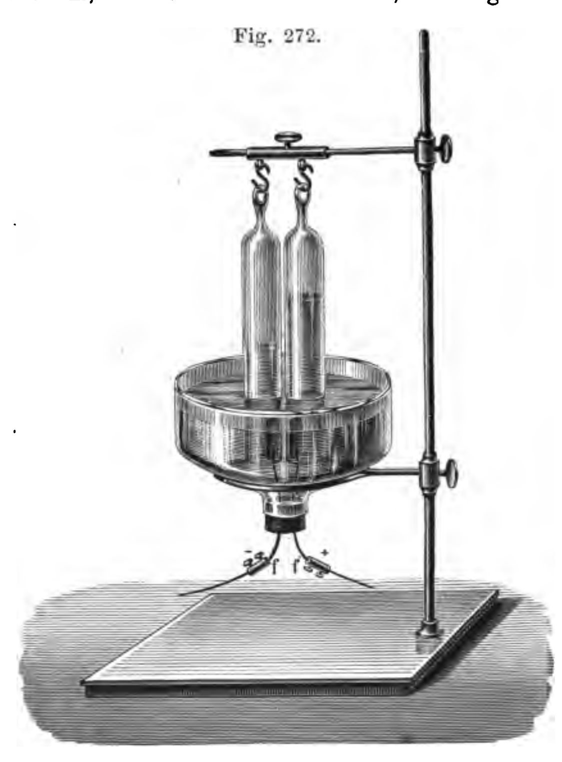
des Erdmagnetismus und dem Radius des Kreises. Giebt ein Strom von bekannter Intensität i_0, gemessen in Ampère, einen Ausschlag α_0, so ist:

$$i_0 = K tg \alpha_0 \qquad K = i_0 / tg \alpha_0.$$

Man erhält so den Reductionsfactor der Tangentenbussole K auf Ampère.

Uebung. 1) Man schaltet in einen Stromkreis, Fig. 273, ein Element E, einen Stromunterbrecher U, die Tangentenbussole T, ein Wasserstoffvoltameter[1]) V von kleinem Widerstand, Fig. 272, bestehend aus zwei Platinplatten, die in verdünnte Schwefelsäure tauchen und über die zwei Messcylinder h und o gehängt sind, und einen Rheostaten R, um die Stromstärken passend zu reguliren. Die genauesten Messungen erhält man, wenn etwa $\alpha = 45^0$ ist.

Fig. 272.



2) Man schliesst den Strom und lässt das Knallgas einige Zeit sich entwickeln, ohne dasselbe aufzufangen, damit das Wasser im Voltameter sich mit ihm sättigt.

3) Man schiebt den Cylinder h beim Beginn einer vollen Minute über die negative Elektrode und liest gleichzeitig die Zeit ab: z.

4) Man liest die Ausschläge der Nadel von Minute zu Minute ab, sie seien $\alpha_0\ \alpha_1\ \alpha_2\ \alpha_3 \ldots \alpha_n$. Der mittlere Ausschlag in den einzelnen Minuten ist:

$$\tfrac{1}{2}(\alpha_0 + \alpha_1),\ \tfrac{1}{2}(\alpha_1 + \alpha_2) \ldots$$

5) Ist der Messcylinder hinlänglich weit gefüllt, so unterbricht man den Strom. Dies geschehe nach n Minuten.

---

[1]) Man kann auch ein Knallgasvoltameter (Fig. 275) verwenden und das Knallgas auffangen.

6) Man liest das Volumen v des Gases im Messcylinder, die Temperatur t, die Höhe der Flüssigkeitssäule im Messcylinder h' und den Barometerstand b ab.

7) Man reducirt nach S. 84 das beobachtete Volumen v auf dasjenige v_0 bei 0^0 und 760 mm. Ist e die Spannkraft des Wasserdampfes (die wir über der verdünnten Schwefelsäure gleich der über Wasser setzen) bei t^0 und $h = h'/13{,}6$, so ist:

$$v_0 = \frac{v \,.\, (b - h - e)}{760\,(1 + \alpha t)}.$$

Berechnung. Das Volumen v_0 ist in n Minuten abgeschieden, in einer Minute ist also v_0/n abgeschieden, und zwar bei einem mittleren Ausschlag der Tangentenbussole [1]) von

$$1/n\,[{}^1/_2\,(\alpha + \alpha_1) + {}^1/_2\,(\alpha_1 + \alpha_2) + \cdots + {}^1/_2\,(\alpha_{n-1} + \alpha_n)]$$
$$= 1/n\,({}^1/_2\,\alpha_0 + \alpha_1 + \cdots + \alpha_{n-1} + {}^1/_2\,\alpha_n).$$

Ein Strom von 1 Ampère scheidet in einer Minute 10,44 cbcm Knallgas [2]), also 6,96 cbcm Wasserstoff ab; die Stromstärke i, welche v_0/n cbcm abscheidet, ist also
$i = v_0/6{,}96\,n$ Ampère.

Es ist also:

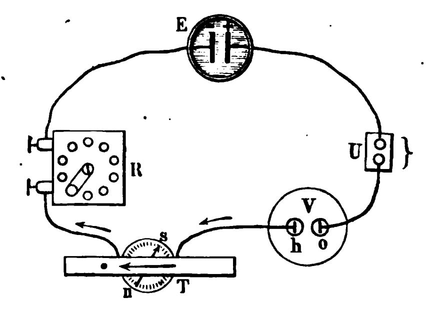
$$v_0/6{,}96\,n \text{ Amp.} = K\,tg\,\{1/n\,({}^1/_2\,\alpha_0 + \alpha_1 + \cdots + \alpha_{n-1} + {}^1/_2\,\alpha_n)\},$$

woraus durch Division K sich ohne Weiteres ergiebt.

Hat sich der Ausschlag α_0 während des Versuches nicht geändert, so ist:

$$v_0/6{,}96\,n = K\,tg\,\alpha_0.$$

Fig. 273.



Multiplicirt man mit dem berechneten K die Tangente des Ablenkungswinkels, so erhält man die Stromstärke in Ampères ausgedrückt.

Bemerkung. Statt aus der Menge abgeschiedenen Wasserstoffes die Stromstärke in Ampères zu bestimmen, kann man auch die durch den Strom abgeschiedene Menge irgend eines Metalles, Silber, Kupfer (vergl. S. 351), verwenden, eventuell durch Division mit dem Aequivalentgewicht (nicht Atomgewicht) die Menge des abgeschiedenen Wasserstoffes (vergl. S. 412, Faraday'sches Gesetz) berechnen.

---

[1]) Diese Gleichung gilt nur bei kleinen Aenderungen der Stromstärke.

[2]) Hat man das Volumen abgeschiedenen Knallgases V gemessen, so erhält man das abgeschiedene Volumen Wasserstoff durch Multiplication mit ${}^2/_3$.

2. Spiegelgalvanometer (Fig. 241).

Gebraucht wird: Spiegelgalvanometer; Fernrohr mit Scala; Stativ; Voltameter; Batterie; Astasirungsmagnet.

Das Spiegelgalvanometer ist eine Form der Tangentenbussole (vergl. S. 400), wir haben die wichtigsten Formen derselben oben S. 360 beschrieben.

Uebung. A. Einstellung des Galvanometers.

1) Man stellt das Fernrohr mit Scala senkrecht zum Spiegel auf (S. 26).

2) Man untersucht, ob der Magnet frei schwebt. Dazu beobachtet man die Ruhelage desselben, lenkt ihn durch einen Strom oder einen Magnetstab ab, entfernt die ablenkende Ursache und beobachtet, ob der Spiegel wieder in seine frühere Lage zurückkehrt. Ist das nicht der Fall, so dreht man an den Stellschrauben, welche das Galvanometer tragen, resp. hebt und senkt den Magneten an der Schraube *d*, bis er frei schwebt.

3) Man stellt die Ebene der Spiralen in den magnetischen Meridian. Dazu stellt man a) zunächst die Ebene der Spiralen mittelst einer Magnetnadel ungefähr in denselben; b) verbindet die Klemmschrauben an den Spiralen *b* und *c* durch einen Commutator (dessen Widerstand in beiden Lagen gleich ist) mit den Polen eines constanten Elementes und beobachtet die Ausschläge nach rechts und links beim Umlegen des Commutators. Sind dieselben gleich, so stehen die Spiralen richtig. Ist der Ausschlag auf der einen Seite grösser als auf der anderen, so dreht man den Apparat etwas und stellt denselben Versuch an; so fährt man fort, bis Gleichheit erzielt ist.

B. Astasirung des Galvanometers.

Princip. Die Empfindlichkeit des Galvanometers hängt bei constanter Lage der Spiralen von der richtenden Kraft des Erdmagnetismus ab. Man kann die Empfindlichkeit dadurch erhöhen, dass man die Wirkung der letzteren abschwächt, man astasirt das Galvanometer. Dazu legt man unter oder auch vor das Galvanometer einen Astasirungsmagneten in den magnetischen Meridian, so dass sein Nordpol nach Norden, sein Südpol nach Süden liegt.

Uebung. 1) Man nähert dem einen Pol des Galvanometerspiegels die Pole des Magneten und untersucht, welcher ihn anzieht.

2) Man befestigt den Magnetstab so über, unter oder vor dem Galvanometer, dass unter den Polen des Galvanometerspiegels die gleichnamigen Pole des Magnetstabes liegen.

3) Man leitet mittelst eines Commutators einen etwa ebenso starken Strom durch die Spiralen, wie derjenige ist, den man untersuchen will, und verschiebt den Astasirungsmagneten, bis das Galvanometer einen passenden Ausschlag zeigt. Dann commutirt man die Richtung des Stromes

im Galvanometer und dreht den astasirenden Magneten so lange, bis die Ausschläge auf beiden Seiten gleich gross sind.

C. Aichung des Galvanometers.

Will man mit dem Galvanometer die Stromstärke in Ampères messen, so muss man dasselbe aichen. Man verfährt in derselben Weise, wie bei der Aichung der Tangentenbussole (vergl. S. 401), resp. man schaltet zu dem Spiegelgalvanometer wegen seiner grossen Empfindlichkeit parallel einen Nebenschluss, während im Hauptstromkreise das Voltameter eingeschaltet ist. Man ermittelt mit der Wheatstone'schen Brücke das Verhältniss v des Widerstandes im Galvanometer w_g zu dem ihm parallel geschalteten Widerstande w_d. Ist die Stromstärke im Galvanometer i_g, J die am Voltameter bestimmte, so ist

$$i_g = J \frac{1}{v+1}.$$

D. Bestimmung der Empfindlichkeit eines Galvanometers.

Die Empfindlichkeit eines Spiegelgalvanometers bemisst man nach der Zahl der Milli- oder Mikro-Ampères (S. 5, Anmerkung 3), welche in ihm einen Ausschlag von 1 mm bei 2 m Scalenabstand hervorrufen. Man aicht das Galvanometer wie bei C. angegeben, reducirt auf den Bogen (D.), dividirt die in Milli- oder Mikro-Ampères gemessene Intensität i_g durch die zu i_g gehörige Anzahl von Scalentheilen und multiplicirt mit dem Verhältnisse des benutzten Scalenabstandes in Meter zu 2 m (Reduction auf den conventionellen Abstand).

Directer gelangt man zum Ziele, wenn man ein Element von bekannter constanter elektromotorischer Kraft E, z. B. ein Normaldaniell (vgl. S. 354), durch einen grossen Widerstand W eines geaichten Stöpselrheostaten S. 366 mit dem Galvanometer zu einem Kreise schliesst. Dann ist

$$i_g = \frac{E}{W + w_g};$$

den inneren Widerstand des Elementes kann man hierbei meist vernachlässigen.

Ist das Galvanometer sehr empfindlich, so zweigt man von dem Widerstandskasten an zwei Stellen nach dem Galvanometer hin ab. Hat man E etwa durch 2000 Ω direct geschlossen, und nimmt man den Strom zu beiden Seiten von 1 Ω ab, so wirkt in dem das Galvanometer enthaltenden Kreise nur die elektromotorische Kraft E 1/2000; eventuell kann man in diesem Kreise neue Vorschaltwiderstände aus einem zweiten Rheostaten vorlegen, oder von diesem wieder abzweigen.

E. Reduction der Scalenablesung auf den Bogen.

Bedeutet α den Ablenkungswinkel des Spiegels, so sind die Stromintensitäten proportional $tg\,\alpha$. Wir müssen aus den Verschiebungen der Scala im Fernrohre die Werthe von $tg\,\alpha$ berechnen.

Das Fernrohr wird so eingestellt, dass ohne Strom das Bild des über der Mitte des Objectivs befindlichen Scalentheiles z_0 mit dem Fadenkreuz zusammenfällt. Geht ein Strom durch das Galvanometer und erscheint der Theilstrich z_1 am Fadenkreuze, so beträgt die Ablenkung $z_1 - z_0$ Scalentheile.

Ist die Entfernung der Scala von dem Spiegel y, so ist nach S. 23

$$tg\,2\,\alpha = (z_1 - z_0)/y.$$

Bei kleinen Ablenkungen ist die Tangente sehr nahe gleich dem Ablenkungswinkel, es ist dann $tg\,2\alpha = 2\,tg\,\alpha = 2\,\alpha$[1]), also angenähert

$$tg\,\alpha = (z_1 - z_0)/2\,y,$$

d. h. $tg\,\alpha$, also auch die Stromstärke ist proportional $z_1 - z_0$, d. h. der Verschiebung der Scala im Fernrohre.

Für genaue Bestimmungen muss man aus dem Werthe von $tg\,2\,\alpha$ den Winkel α berechnen und daraus $tg\,\alpha$.

1) Die Winkel sind in der S. 25 angegebenen Weise zu messen.

VI. Wärmeentwickelung durch den galvanischen Strom.

Das Joule'sche Gesetz.

Gebraucht wird: Zwei Calorimeter mit Ebonitdeckel und Platinspiralen, Wassermantel (Fig. 105); Thermometer, Ampèremeter, Voltmeter, Waage mit Gewichten, Terpentinöl, Wheatstone'sche Brücke, kleines Calorimeter zur Bestimmung des Wasserwerthes des Thermometers, zwei Unterbrecher, wasserfreier Alkohol, Säule von zwei Accumulatoren, Verbindungsdrähte.

Einleitung. Fliesst ein galvanischer Strom durch einen Leiter, so wird derselbe erwärmt. Die im Leiter auftretende Wärmemenge entspricht der von den elektrischen Kräften bei der Bewegung der Elektricität geleisteten Arbeit. Beträgt der Spannungsunterschied (die Potentialdifferenz) an den beiden Enden eines drahtförmigen Stückes des Leiterkreises E Volt und ist die Stromstärke J Ampère, so ist die beim Durchgange des Stromes in der Zeiteinheit in diesem Leiterstück geleistete Arbeit, d. h. der Effect $A = EJ$ Volt-Ampère.

Fliesst durch einen Leiter, an dessen Enden ein Spannungsunterschied von 1 Volt ist, ein Strom von 1 Ampère, so wird dabei eine Arbeit geleistet von 1 Watt = 1 Volt × 1 Ampère, der obige Effect ist also: $A = EJ$ Watt.

Da 1 Watt = 10^7 Erg pro Secunde (10^7 Erg/sec.) = 0,102 kg m/sec. = 0,00136 Pferdekräfte (P. S.), so ist A auch gleich $10^7\ EJ$ Erg/sec. = 0,102 EJ kg m/sec. = 0,00136 EJ Pferdekräfte.

Dieser Effect dient zur Erwärmung des Leiters. Da 1 Watt 0,24 gr-cal./sec. entspricht, so ist die pro Secunde im Leiterstück verbrauchte und als Wärme auftretende Arbeit

$$A = 0{,}24\ EJ \text{ gr-cal./sec.}$$

Nach dem Ohm'schen Gesetze ist $E = JW$, also ist die Arbeit

$$A = 0{,}24\ J^2 W \text{ gr-cal./sec.}$$

Während einer Zeit von Z Secunden wird die Arbeit ZA geleistet.

Man erhält den Satz von Joule: Ein Strom von der Intensität J, der durch ein Leiterstück von dem Widerstande W fliesst, erzeugt während Z Secunden eine Wärmemenge

$$Q = j\,J^2\,W \times Z \text{ gr-cal.}$$

Die Erwärmung durch den Strom ist direct proportional der Zeit des Stromdurchganges, dem Quadrate der Intensität und dem Widerstande.

Messen wir die Stromstärke in Ampère, den Widerstand in Ohm und die Zeit in Secunden, so ist, wie erwähnt, $j = 0{,}24$.

1. Prüfung des Gesetzes.

Princip. Man leitet den Strom einer constanten Kette, etwa eines oder mehrerer Accumulatoren, durch eine Spirale aus dünnem Platindraht vom Widerstand W, welche in eine in einem Calorimeter befindliche nicht leitende Flüssigkeit eingetaucht ist, und bestimmt calorimetrisch die erzeugte Wärmemenge Q. Zugleich bestimmt man aus der gemessenen Intensität J und der an den Enden der Spiralen herrschenden Spannungsdifferenz (elektromotorischen Kraft) E die Stromarbeit zu $A = E\,J$ Watt $= 0{,}24$ gr-cal./sec. $= 0{,}24\,J^2\,W$ gr-cal./sec., wobei die Grössen Q und A einander gleich sind.

Apparat. Die Calorimeter C sind 6 cm hohe, 4 cm weite Messinggefässe. Die Ebonitdeckel derselben tragen zwei Klemmschrauben A und B, an deren untere Fortsetzung die Enden einer Spirale aus einem ca. 0,1 mm dicken Platindraht festgeklemmt sind. In der Mitte haben die Deckel eine Durchbohrung für das Thermometer und eine zweite für einen Messingrührer.

Zur Bestimmung der Widerstände W der Platinspiralen wird die Wheatstone'sche Brücke verwendet (s. S. 376 ff.).

Zur Bestimmung der Stromstärke J, die durch einen vorgeschalteten Rheostaten R geeignet regulirt werden kann, wird ein Galvanometer mit bekannter Constante benutzt (S. 405), oder ein in den Stromkreis geschaltetes Ampèremeter. Will man ein Galvanometer benutzen, so wird man es meist in einen Nebenschluss bringen (S. 350). Zur Bestimmung des Spannungsunterschiedes dient ein Voltmeter.

Uebung. I. Bestimmung des Wasserwerthes des Calorimeters und Füllung desselben.

1) Man wägt das Messinggefäss mit dem Messingrührer, Gewicht p; Wasserwerth des Calorimeters $q = p\,\sigma$ (σ die specifische Wärme des Messings $= 0{,}085$). Die Ableitung der Wärme durch die Klemmschrauben wird vernachlässigt.

2) Man wägt das Calorimeter allein, Gewicht p', füllt es so weit mit reinem Terpentinöl, dass der Platindraht ganz eintaucht, die Messingzuleitungen aber von der Flüssigkeit noch nicht berührt werden, und wägt wieder; Gewicht p'. Dann ist $P = p' - p$ das Gewicht des Terpentinöls.

3) Man bestimmt den Wasserwerth des Thermometers (S. 179).

II. Bestimmung der Widerstände.

Mittelst der Wheatstone'schen Brücke werden die Widerstände W_{I} und W_{II} der zu verwendenden Platinspiralen ermittelt.

III. Bestimmung der Stromarbeit und der Erwärmung.

1) Man setzt das gefüllte Calorimeter mit der Spirale W_I und dem Thermometer in einen der (S. 179) beschriebenen Wassermäntel.

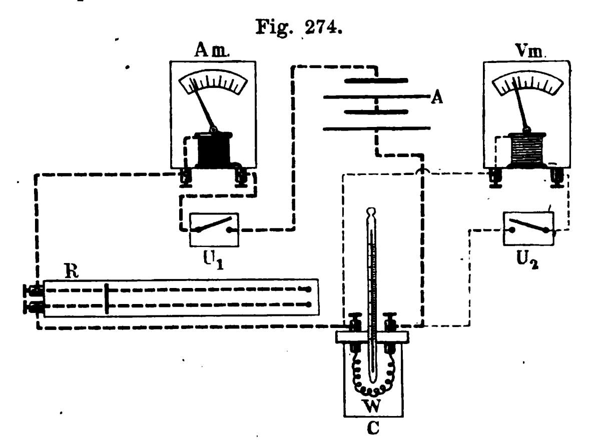
2) Man bildet einen Stromkreis aus einigen Accumulatoren A (siehe das beigegebene Schaltungsschema, Fig. 274), einem Unterbrecher U_1, dem Ampèremeter Am, einem Rheostaten R und der Platinspirale W im Calorimeter C.

3) Man zweigt von den Klemmschrauben A und B der Platinspirale einen Nebenschluss über einen zweiten Unterbrecher U_2 durch das Voltameter Vm ab.

4) Man liest die Anfangstemperatur t_0 des Thermometers ab.

5) Man schliesst nach der Uhr bei einer vollen Minute durch den Unterbrecher U_1 den Strom und liest von Minute zu Minute, während

Fig. 274.



man rührt, die Temperatur t_1, t_2, . . ., t_n, sowie die mittlere Stromstärke J_1 ab.

6) Man schaltet zu Anfang und zu Ende des Versuches durch den Unterbrecher U_2 das Voltmeter kurze Zeit ein und liest die Spannungsdifferenz E_1 ab.

7) Nachdem das Thermometer um einige Grade gestiegen ist, öffnet man am Ende der $n$ten Minute den Strom und liest die Endtemperatur t_n ab.

8) Man verfährt mit W_{II} ebenso, nachdem man durch vorgeschalteten Widerstand des Rheostaten bewirkt hat, dass die Stromintensität J_1 dieselbe ist, wie vorher.

9) Man führt eine weitere Versuchsreihe mit W_I durch, nachdem man durch den Widerstand R eine andere Stromstärke J_2 hergestellt hat [1]).

[1]) Bei genaueren Messungen muss der Strahlung Rechnung getragen werden (vergl. S. 181).

Berechung. Bei I. wurde gefunden: der Wasserwerth des Calorimeters q, das Gewicht des Terpentinöls P, der Wasserwerth des Thermometers τ.

Bei III. wurde gefunden: die Anfangstemperatur t_o, die Endtemperatur t_n, die Dauer des Versuches Z Secunden.

Ist ferner c die specifische Wärme des Terpentinöls, so ist die vom Calorimeter pro Secunde aufgenommene Wärmemenge

$$Q = \frac{1}{Z}(q + \tau + cP)(t_n - t_o).$$

Bei II. wurde gefunden: der Widerstand der Platinspirale W_I. Unter III. die Stromstärke J_1, die an den Enden wirksame Spannungsdifferenz E_1, dann ist die in der Secunde geleistete Stromarbeit A_1 einmal gleich $E_1 J_1$ Watt $= 0{,}24\, E_1 J_1$ gr-cal./sec. A_2, das andere Mal gleich $J_1^2 W_I$ Watt $= 0{,}24\, J_1^2 W_I$ gr-cal./sec. A_1 und A_2 müssen untereinander, sowie der im Calorimeter abgegebenen Wärmemenge Q gleich sein:

$$A_1 = A_2 = Q.$$

Durch Uebung III, 1) bis 7) findet man für den Widerstand W_1 pro Secunde die Wärmearbeit Q_I, während die Stromstärke J_1 war. Durch Uebung III, 8) die Wärmearbeit Q_{II} für den Widerstand W_{II} bei gleicher Intensität J_1.

Nach dem Joule'schen Gesetze muss dann

$$\frac{Q_I}{Q_{II}} = \frac{W_I\, J_1^2}{W_{II}\, J_1^2} = \frac{W_I}{W_{II}}$$

sein, da J_1 in beiden Fällen dieselbe war.

Durch Uebung III, 9) findet man für den Widerstand W_I pro Secunde eine Stromarbeit Q_{III} bei einem Strome von der Intensität J_2. Es muss jetzt also

$$\frac{Q_I}{Q_{III}} = \frac{J_1^2\; W_I}{J_2^2\; W_I} = \frac{J_1^2}{J_2^2}$$

sein, da der Widerstand W_I in beiden Fällen derselbe ist.

Beispiel: Es wurde gefunden:

I. Das Gewicht des Calorimeters mit Rührer zu 34,95, der Wasserwerth desselben ($\sigma = 0{,}09$) $q = 3{,}14$, Wasserwerth des Thermometers $\tau = 0{,}5$, Gewicht des Terpentinöls $P = 43{,}16$, specifische Wärme desselben $c = 0{,}43$, die Anfangstemperatur $t_0 = 23{,}4^0$, die Endtemperatur $t_n = 27{,}8^0$, die Versuchsdauer $Z = 3$ Min. $= 180$ Sec., der Widerstand der Spirale I $W_I = 1{,}9$ Ohm, die Intensität $J_1 = 1{,}15$ Ampère, die Spannungsdifferenz $E = 2{,}1$ Volt. Danach ist

$$Q_I = {}^1/_{180}\,(3{,}14 + 0{,}5 + 43{,}16 \,.\, 0{,}43) \,.\, 4{,}4 = 0{,}543 \text{ gr-cal./sec.};$$

$$A_1 = 0{,}24 \,.\, 1{,}15 \,.\, 2{,}1 = 0{,}58 \text{ gr-cal./sec.}; \; A_2 = 0{,}24 \,.\, (1{,}15)^2 \,.\, 1{,}9 = 0{,}57 \text{ gr-cal./sec.}$$

II. $W_{II} = 3{,}8$ Ohm; $t_0 = 27{,}7^0$; $t_n = 33{,}8^0$; $Z = 120$ sec.; $J_1 = 1{,}1$. Sonst wie bei I.

Daraus ergiebt sich:

$$Q_{II} = {}^1/_{120}\,(3{,}14 + 0{,}5 + 43{,}16 \,.\, 0{,}43)\,.\,6{,}1 = 1{,}04 \text{ gr-cal./sec.}$$

$$\text{Also ist } \frac{Q_I}{Q_{II}} = \frac{0{,}543}{1{,}04} \text{ sehr nahe } = {}^1/_2 = \frac{W_I}{W_{II}}.$$

III. $W_I = 1{,}9$ Ohm; $t_0 = 24{,}4$; $t_n = 30{,}6$; $Z = 180$ sec.; $J_2 = 1{,}4$ Ampère. Sonst wie bei I.

Also $Q_{III} = 0{,}77$ gr-cal./sec.;

$$\frac{Q_{III}}{Q_I} = \frac{0{,}77}{0{,}543} = 1{,}44; \; \frac{J_2^2}{J_1^2} = \frac{1{,}4^2}{1{,}15^2} = 1{,}46.$$

Wegen der nicht berücksichtigten Wärmeverluste des Calorimeters durch Strahlung werden bei diesem einfachen Verfahren die Werthe Q stets etwas zu klein. Für genaue Versuche muss man dieselben (vergl. S. 181) berücksichtigen.

2. Bestimmung der specifischen Wärme von Flüssigkeiten mit Hülfe des Joule'schen Gesetzes.

Uebung. 1) Man füllt das Calorimeter mit P gr Terpentinöl, beobachtet die Anfangstemperatur t_0, leitet einen Strom eine Zeit lang hindurch und liest von Minute zu Minute die Stromstärken, sowie die Temperaturen ab, letztere auch noch einige Minuten vor und nach der Schliessung bezw. Unterbrechung des Stromes.

2) Man corrigirt die Endtemperatur des Calorimeters (vergl. S. 181). Dann ist

$$0{,}24\, J_m^2\, W Z = (q + \tau + cP)\,(t_{n_1} - t_0 + A),$$

wo J_m die mittlere Stromstärke, A die Correction der Temperatur wegen der Strahlung bedeutet. Aus dieser Gleichung berechnet sich c.

Die Uebung wird noch mit wasserfreiem Alkohol angestellt.

VII. Elektrolyse und Polarisation.

1. Elektrolyse.

1. Faraday's Gesetze.

Gebraucht wird: Knallgasvoltameter, Fig. 275 und Fig. 276: Silber- bezw. Kupfervoltameter; Fig. 277; reine verdünnte Schwefelsäure (1 : 10); Silbernitratlösung in schwarzer Flasche, Kupfervitriollösung; kleine Bussole; feine Waage mit Gewichten; Batterie von zwei bis drei Bunsenelementen oder Accumulatorenzellen; Verbindungsdrähte.

Einleitung. Die Leiter werden eingetheilt (vgl. S. 372) in Leiter erster Classe und in Leiter zweiter Classe oder Elektrolyte. Leitet man durch die Leiter zweiter Classe einen Strom, so werden sie zersetzt, elektrolysirt; die durch den Strom direct abgeschiedenen Bestandtheile heissen Ionen; an der mit dem negativen Pole der Säule verbundenen Elektrode, der Kathode, scheidet sich ab das Kation, der elektropositive Bestandtheil des Elektrolyten, an der mit dem positiven Pole verbundenen, der Anode, das Anion, der elektronegative Bestandtheil des Elektrolyten.

Nach den älteren Anschauungen zerlegte der Strom selbst auf seiner Bahn im Elektrolyten die Molecüle in ihre Ionen; nur an den Elektroden kamen diese zur Ausscheidung, während im Inneren fortwährend eine Wiedervereinigung eintrat; nach den Anschauungen von Arrhenius (vgl. S. 386) ist der Elektrolyt von vornherein in Ionen gespalten und die Wirkung des Stromes besteht darin, die +-Ionen in der einen Richtung, die —-Ionen in der entgegengesetzten zu verschieben.

Die Ionen selbst sind nur in den seltensten Fällen zu beobachten.

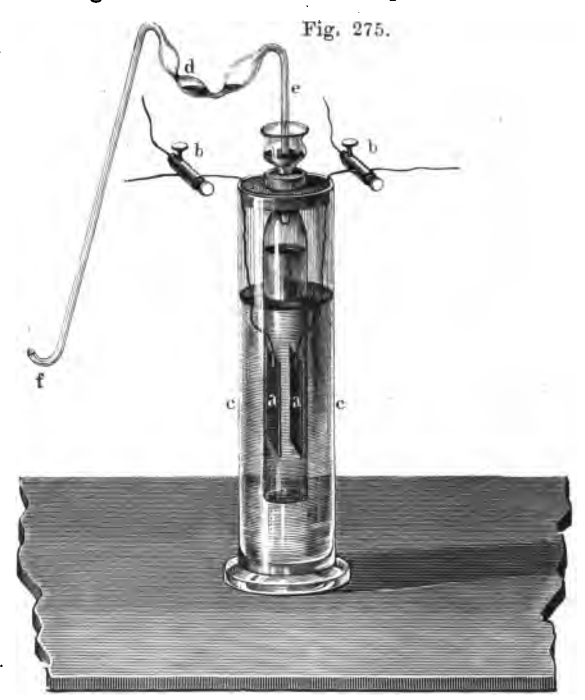
Für die Mengen der durch den Strom abgeschiedenen Substanzen hat Faraday folgende Gesetze aufgestellt:

1. Die durch verschieden starke Ströme aus demselben Elektrolyten abgeschiedenen Mengen desselben Ions verhalten sich wie die Stromstärken. Hierauf beruht die Messung der Stromstärken auf elektrochemischem Wege (vergl. oben S. 351).

2. Fliessen galvanische Ströme von derselben Intensität durch verschiedene Elektrolyte, so werden äquivalente Mengen derselben zersetzt; die Quantitäten der aus ihnen an beiden Elektroden abgeschiedenen Stoffe stehen im Verhältniss ihrer Aequivalentgewichte; man spricht daher von elektrochemischen Aequivalenten.

Hier kommen die Aequivalentgewichte in Betracht, also die Mengen, welche sich mit 1 Atom eines univalenten Elementes, etwa Cl oder H, verbinden, und nicht die Atomgewichte; fliesst derselbe Strom etwa durch Lösungen von Eisenchlorür, $Fe\,Cl_2$, und Eisenchlorid, $Fe_2\,Cl_6$,

Fig. 275.



so wird in beiden gleich viel Chlor abgeschieden, die abgeschiedenen Eisenmengen verhalten sich aber wie 3 : 2; ähnlich ist es bei Quecksilberoxydul- und -oxydsalzen etc. In den Oxydul- und den Oxydsalzen haben also die Metalle verschiedene elektrochemische Aequivalente.

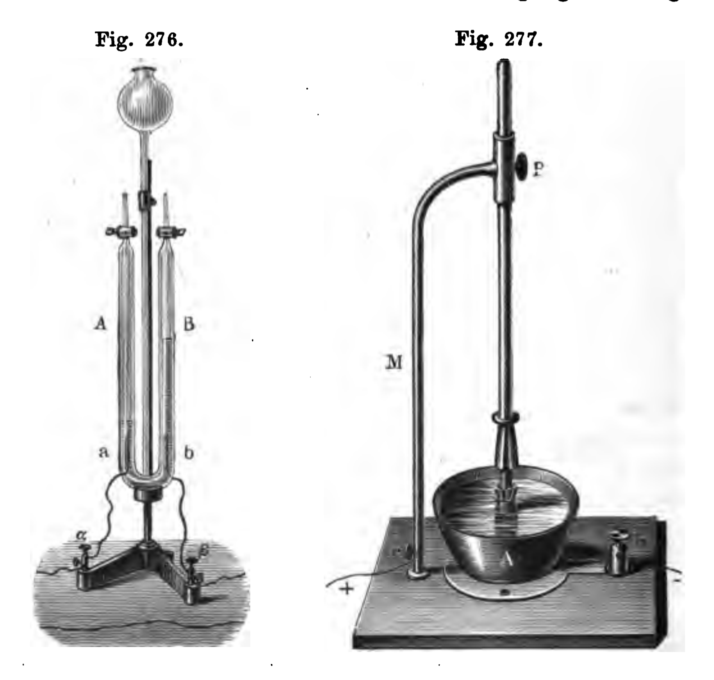
Apparate. 1. Knallgasvoltameter. Die Elektroden *aa* (Fig. 275) von Platinblech sind an Platindrähte angenietet, welche in die Wände des geschlossenen Glascylinders eingeschmolzen sind. Der Cylinder wird mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt, in seinen Hals ist das Glasrohr *e* eingeschliffen. Zur Dichtung giesst man auf den Schliff noch etwas Quecksilber. Zur Abkühlung wird der Cylinder in ein mit einer

schlecht leitenden Flüssigkeit (etwa Weingeist) gefülltes Glas *cc* gesetzt. Das Ende *f* des Rohres *c* mündet in Wasser unter einem mit Wasser gefüllten Messcylinder.

2. Voltameter zum getrennten Auffangen der gasförmigen Zersetzungsproducte (Fig. 276, vgl. auch Fig. 272). Die Platinbleche *a* und *b* sind von unten in die verticalen, getheilten Schenkel *A* und *B* eines U-Rohres eingeschmolzen, oben sind *A* und *B* durch Hähne verschlossen. Der Fuss, an dem die Klemmschrauben *α* und *β* für die Zuleitungsdrähte befestigt sind, besteht aus isolirendem Material.

3. Kupfer- und Silbervoltameter (Fig. 277). Auf einer mit einer Schraube *b* verbundenen Metallplatte steht eine Platinschale *A*. Der mit einer Klemmschraube *c* versehene Messingbügel *M* trägt oben

Fig. 276. Fig. 277.



eine Metallhülse mit einer seitlichen Schraube *B*, in der sich ein Messingstab verschieben lässt, welcher unten eine Kupferhalbkugel oder ein Silberstück trägt, das mit etwas Filtrirpapier umwunden ist. Man füllt die Schale mit Kupfer- resp. Silbernitratlösung.

Uebung 1. Vergleichung der abgeschiedenen Sauerstoff- und Wasserstoffmengen. Man schaltet in derselben Weise wie bei der Aichung der Tangentenbussole (S. 400). Man füllt das Voltameter (Fig. 272 resp. 276) mit verdünnter Schwefelsäure (1 Schwefelsäure zu 10 Wasser) und leitet den Strom hindurch; die abgeschiedenen O_2- und H_2-Volumina verhalten sich annähernd wie 1 : 2.

Nach dem Avogadro'schen Gesetze sind in gleichen Volumen gleich viel Molecüle vorhanden, auf 1 Mol. H_2 ist also nur $^1/_2\, O_2$ oder 1 Aeq. Sauerstoff abgeschieden.

Uebung 2. Vergleichung der abgeschiedenen Silber- und Wasserstoffmengen.

1) Man hält einen Theil des stromzuführenden Leitungsdrahtes über eine kleine Bussole parallel der Nadel, beobachtet den Ausschlag der Nadel und bestimmt die Stromrichtung nach der Ampère'schen oder der Daumenregel (vgl. S. 368). Die Klemme, von welcher der positive Strom kommt, bezeichnet man durch ein + Zeichen.

2) Man schaltet das Voltameter (Fig. 272) allein ein, lässt das Gas entweichen, ohne es aufzufangen, damit sich die verdünnte Schwefelsäure vollkommen mit dem Gase sättigt.

3) Man bildet einen Stromkreis, in dem der Unterbrecher, das Wasserstoffvoltameter und das Silbervoltameter hinter einander geschaltet sind, letzteres so, dass die Platinschale Kathode ist.

4) Man wägt die Platinschale leer, das Gewicht sei P, füllt dieselbe mit der Silbernitratlösung und schiebt den Messcylinder über die Kathode des Wasserstoffvoltameters.

5) Man schliesst den Strom einige Zeit.

6) Man liest das Volumen V des entwickelten Wasserstoffs, den Barometerstand, die Höhe der Wassersäule im Messcylinder und die Temperatur ab, giesst die Silbernitratlösung aus und spült die Platinschale mit Wasser, Alkohol und Aether nach, trocknet und wägt. Gewicht P_1.

Berechnung. Man reducirt das Volumen V nach S. 84 auf dasjenige $V_{0,760}$ bei 0° und 760 mm. 1 cbcm Wasserstoff wiegt bei 0° und 760 mm 0,00008958 gr. Die abgeschiedene Menge Silber ist $P_1 - P$; das Verhältniss der abgeschiedenen Mengen Wasserstoff und Silber ist nahe gleich dem Verhältniss der Aequivalentgewichte 1 : 107,66.

Uebung 3. Vergleichung der abgeschiedenen Kupfer- und Wasserstoffmengen.

Man verfährt wie bei Uebung 2, nur ersetzt man das Ag-Voltameter durch das Cu-Voltameter und spült mit Methylalkohol aus.

Die Berechnung ist dieselbe wie bei 2. Das Verhältniss der abgeschiedenen Mengen H : Cu ist 1 : 31,6, gleich dem der Aequivalentgewichte und nicht gleich dem der Atomgewichte 1 : 63,2.

2. Elektrolytische Bestimmung des Kupfers im Kupfersulfat.

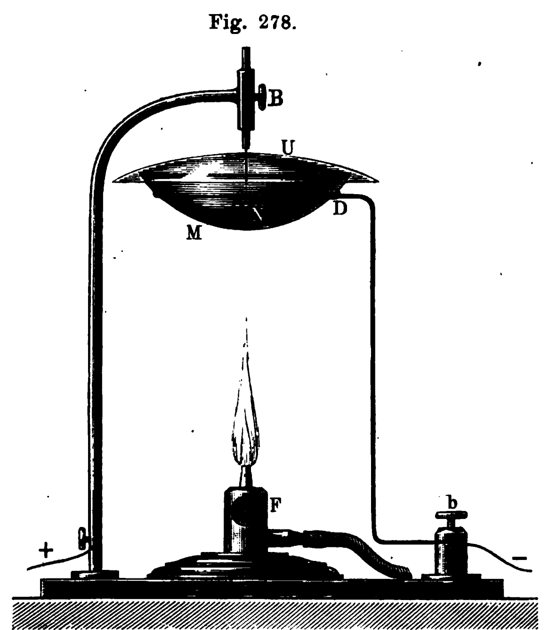
Gebraucht wird: Ring für die Platinschale am Kupfervoltameter; Platinblechscheibe; durchbohrtes Uhrglas; Bunsenbrenner; Kupfersulfat; Spritz-

flasche; Lösung von Ammoniumoxalat (kalt gesättigt); Reagensglas; Glasstab; Ferrocyankaliumlösung.

Princip. Man elektrolysirt eine Lösung von Kupfersulfat, die eine abgewogene Menge P des Sulfates enthält, und bestimmt die an der Kathode abgeschiedene Kupfermenge p durch Wägung.

Apparat. Auf dem Drahtringe D steht die Platinschale M; der Träger von D ist mit der Klemme b verbunden. Auf die Schale wird ein in der Mitte durchbohrtes Uhrglas U gelegt; durch die Durchbohrung geht ein Platindraht, der unten eine in die Schale tauchende Platinplatte N trägt; dieser Platindraht wird durch B gehalten (Fig. 278).

Fig. 278.



Uebung. 1) Die Platinschale wird mit Wasser ausgewaschen, getrocknet und gewogen; Gewicht P_1 gr.

2) Ein reiner, trockener Kupfersulfatkrystall von ca. 0,1 gr Gewicht wird in der Schale gewogen; Gewicht P_2, also Gewicht des Krystalles $P = P_2 - P_1$.

3) Man schüttet in die Schale etwas destillirtes Wasser und dann so viel von einer kalt gesättigten Lösung von Ammoniumoxalat [1]), dass die Schale etwa bis auf 0,5 cm vom Rande gefüllt ist.

4) Die Schale wird auf den Ring gesetzt und mit dem Uhrglase bedeckt, nachdem das Platinblech eingesenkt ist; eine kleine Gasflamme F erwärmt die Lösung auf circa 70 bis 80°.

5) Man elektrolysirt, bis ein mit einem spitzen Glasstabe herausgenommener Tropfen der Flüssigkeit in einem Tropfen Ferrocyankalium auf einer Porcellanplatte keine Bräunung mehr zeigt.

6) Die Schale wird wiederholt mit destillirtem Wasser, dann mit Methylalkohol ausgespült und sorgfältig getrocknet.

---

1) Kleine Zusätze zu den zu elektrolysirenden Flüssigkeiten haben auf die Form der abgeschiedenen Substanzen grossen Einfluss, wohl in Folge einer Aenderung in den secundären Processen.

7) Man wägt die Platinschale wieder; Gewicht P_3 gr. Also ist die abgeschiedene Kupfermenge $p = P_3 - P_1$.

Beispiel: $P_1 = 14{,}874$, $P_2 = 14{,}998$, $P = 0{,}124$, $P_3 = 14{,}906$; $p = 0{,}032$; 1 gr Kupfer würde also in 3,87 gr Kupfersulfat enthalten sein. Da $CuSO_4 + 5H_2O = 249$, $Cu = 63$ ist, so ist der theoretische Werth dieser Menge 3,95 gr.

3. Primäre und secundäre Processe. Verschiedene Elektrolysen.

Gebraucht wird: Drei Zersetzungszellen (Fig. 279); Jodkaliumlösung; Stärkekleister; verdünnte Schwefelsäure; Natriumsulfatlösung; rothe und blaue Lackmuslösung; Kaliumacetatlösung; Apparat (Fig. 280). Becherglas mit zwei mit Klemmschrauben versehenen Bleiplatten; Batterie von drei Bunsenelementen; Verbindungsdrähte.

Einleitung. Man kann Elektrolyte im geschmolzenen oder im gelösten Zustande elektrolysiren; im festen Zustande leiten nur wenige so gut, dass die Zersetzungen leicht beobachtet werden könnten.

Die theoretisch einfachsten Elektrolysen sind diejenigen von geschmolzenen Salzen. Könnten wir dieselben unter solchen Bedingungen vornehmen, dass die sich abscheidenden Ionen im freien Zustande verbleiben, freilich nach Abgabe ihrer Ladungen, so wären die an den Elektroden auftretenden Producte auch diejenigen, welche der Strom aus der Verbindung abgeschieden hat; wir würden den primären Process beobachten. Dieser primäre Process ist bei den geschmolzenen und den gelösten Elektrolyten der gleiche. Diese primär abgeschiedenen Producte treten aber nur in den seltensten Fällen wirklich auf: oft treten die Ionen zu Molecülen zusammen, weiter spielen sich zwischen den abgeschiedenen Ionen und dem Lösungsmittel oder dem gelösten Salze, ferner zwischen ihnen und den Elektroden chemische Processe ab: die secundären Processe; wir beobachten dann nur die Producte dieser letzteren.

Im Folgenden bedeutet ein über das chemische Zeichen gesetztes + oder —, dass sich der betreffende Körper am entgegengesetzt geladenen Pole abscheidet, der „elektropositive" Bestandtheil der Verbindung also am — Pole, der Kathode, der „elektronegative" am + Pole, der Anode (Ungleichnamige Elektricitäten ziehen sich an). Wird HCl zerlegt, so scheidet sich primär ab H und Cl, aus den aus 2 HCl sich abscheidenden H und Cl bildet sich H_2 und Cl_2, also:

primär . . . . . $HCl = \overset{+}{H} + \overset{-}{Cl}$,
secundär am — Pol: $H + H = H_2$,
„ „ + Pol: $Cl + Cl = Cl_2$.

Apparat. Zur Elektrolyse dienen Zersetzungszellen (Fig. 279), in welche zwei mit Klemmschrauben verbundene Platinbleche ein-

tauchen. Zum Auffangen der gasförmigen Producte, welche sich bei einer Elektrolyse bilden, wendet man z. B. das Voltameter (Fig. 276) an.

Uebungen. 1. Elektrolyse von Jodkalium. Man setzt in einer Zersetzungszelle zu einer Lösung von Jodkalium etwas Stärkekleister und leitet den Strom hindurch. Am + Pol scheidet sich Jod ab, das den Stärkekleister blau färbt, am — Pol entweicht Wasserstoff:

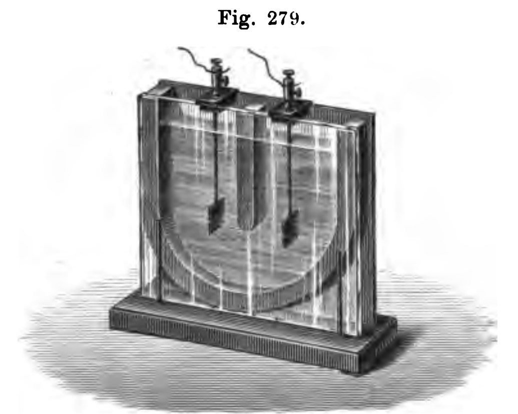
$$\text{primär} \ldots\ldots \quad KJ = \overset{+}{K} + \overset{-}{J},$$
$$\text{secundär am} - \text{Pol:} \quad 2K + 2H_2O = 2KHO + H_2,$$
$$\text{„} \quad \text{„} + \text{Pol:} \quad J + J = J_2.$$

2. Elektrolyse von verdünnter Schwefelsäure. Man zersetzt in einem Voltameter (Fig. 276) verdünnte Schwefelsäure. Am positiven Pol scheidet sich Sauerstoff, am negativen Wasserstoff aus:

$$\text{primär } H_2SO_4 = \overset{+}{H_2} + \overset{-}{SO_4}$$
$$\text{secundär am} + \text{Pol } 2(SO_4 + H_2O) = 2(H_2SO_4 + O).$$

Der in statu nascendi abgeschiedene Sauerstoff kann eventuell Ozon bilden, das Wasser zu Wasserstoffsuperoxyd, die Schwefelsäure zu Ueberschwefelsäure oxydiren. Das Volumen des abgeschiedenen Sauerstoffs erscheint dann kleiner als die Hälfte desjenigen des Wasserstoffs.

Fig. 279.



Bemerkung. Man bezeichnet häufig die Elektrolyse der verdünnten Säuren als eine solche des Wassers. Die letztere würde in der That auch $2H_2$ und O_2 liefern. Das reine Wasser leitet den Strom aber nur sehr schlecht und ist auch nur sehr wenig (nach F. Kohlrausch und A. Heydweiler zu $1/10^{10}$) in seine Ionen zerfallen.

3. Elektrolyse von Natriumsulfat. Man versetzt im Apparate (Fig. 279) 1) die Lösung mit blauer, 2) mit schwach gerötheter Lackmustinctur und leitet den Strom hindurch, oder man setzt zu der blauen Lösung nach Beendigung des Versuches 1) einen Tropfen Salzsäure.

Am + Pol tritt bei 1) Röthung, am — Pol bei 2) Bläuung ein. Am + Pol entweicht Sauerstoff, am — Pol Wasserstoff. Der Strom scheidet also am + Pol Säure unter Sauerstoffentwickelung, am — Pol Basis unter Wasserstoffentwickelung ab; dies ist jedoch nur in Folge der secundären Processe der Fall:

$$\text{primär} \ldots Na_2SO_4 = \overset{+}{Na_2} + \overset{-}{SO_4},$$
$$\text{secundär am} - \text{Pol: } Na_2 + 2H_2O = 2NaOH + H_2,$$
$$\text{am} + \text{Pol: } 2SO_4 + 2H_2O = 2SO_4H_2 + O_2.$$

4. Elektrolyse von Kaliumacetat. 1) Man elektrolysirt in dem Apparat (Fig. 280) eine Lösung von Kaliumacetat. Am — Pol entweicht Wasserstoff, am + Pol ein brennbares, kohlehaltiges Gas:

$$\text{primär} \ldots\ldots CH_3COOK = \overset{+}{K} + \overset{-}{CH_3COO},$$
$$\text{secundär am} - \text{Pol: } 2K + 2H_2O = H_2 + 2KHO,$$
$$\text{am} + \text{Pol: } 2[CH_3COO] = (CH_3)_2 + 2CO_2.$$

Die Kohlensäure verbindet sich mit dem am — Pol gebildeten Kaliumhydroxyd zu $2KHCO_3$.

2) Man fängt das durch das Glasrohr entweichende Gas über Wasser in einem Probirrohre auf und zündet es an; das Gas verbrennt.

Fig. 280.



Wir haben bei dieser Elektrolyse die Verbindung Dimethyl oder Aethan $(CH_3)_2$ erhalten, Kolbe glaubte CH_3, ein organisches Radical, vor sich zu haben, indess ist dies nicht der Fall, wie eine Dampfdichtebestimmung ergiebt, sondern es entsteht $(CH_3)_2$.

5. Secundäre Processe an den Elektroden. 1) Der Strom wird zwischen zwei Bleiplatten durch verdünnte Schwefelsäure geleitet, an der positiven Platte scheidet sich ein braunschwarzer Körper ab, Bleisuperoxyd; dasselbe entsteht in Folge der Einwirkung des Sauerstoffs in statu nascendi auf das Blei. Dieser Process findet bei der Herstellung der Secundärelemente, Accumulatoren, Anwendung. Ebenso werden andere Superoxyde hergestellt. 2) Wir kehren den Strom um, der schwarze Körper verschwindet, er wird durch den sich auf ihm abscheidenden Wasserstoff reducirt.

2. Polarisation.

Gebraucht wird: Wippe Fig. 281 oder 282; Batterie von drei Bunsenelementen; Becherglas mit zwei Platinplatten; verdünnte Schwefelsäure; Galvanometer; Quecksilber im Tropfglase; Leitungsdrähte.

Becherglas mit Bleiplatten; verdünnte Schwefelsäure.

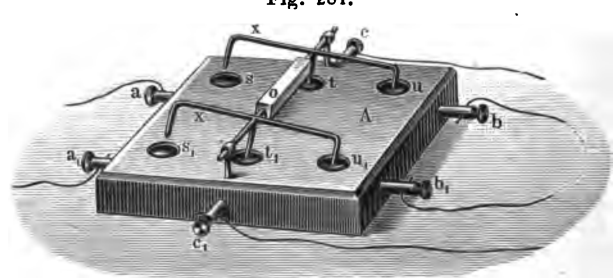
Wheatstone'sche Brücke; Zersetzungszellen mit verdünnter Schwefelsäure, concentrirter Salpetersäure und Chromsäurelösung.

1. Polarisationsströme.

Princip. Leitet man den Strom einer Kette durch verdünnte Schwefelsäure, wobei zwei Platinplatten als Elektroden dienen, so scheiden sich an ihnen Sauerstoff und Wasserstoff ab, schaltet man dann die Kette aus und verbindet die Platinplatten mit einem Galvanometer; so erhält man einen Strom, den Polarisationsstrom, der dem ursprünglichen entgegengesetzt gerichtet ist. Solche Polarisationsströme treten fast bei allen Elektrolysen auf. Die mit den abgeschiedenen verschiedenen Bestandtheilen des Elektrolyten beladenen Elektroden bilden mit der Flüssigkeit ein galvanisches Element. Schliesst man das Element in sich, so werden zur Erzeugung des entstehenden Polarisationsstromes die abgeschiedenen Substanzen verbraucht, und derselbe hört allmählich auf.

Als Apparat zum Ein- und Ausschalten der Zersetzungszelle dient die S. 398 beschriebene Wippe (Fig. 281). Die Klemme c und c_1 ver-

Fig. 281.



bindet man mit der Zersetzungszelle Z, a und a_1 mit der Kette, b und b_1 mit dem Galvanometer. Legt man den Bügel umgekehrt wie in der Figur, so geht der Strom durch die Zelle Z; legt man aber die Bügel so wie in der Figur, so geht der in Folge der Polarisation in Z entstehende Strom durch das Galvanometer.

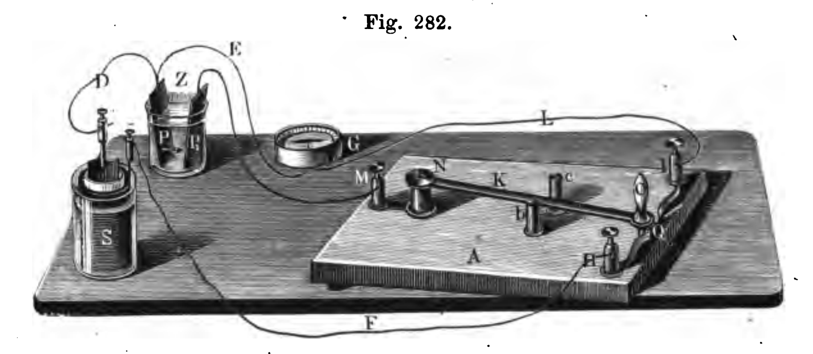
Eine andere Anordnung giebt die Fig. 282. Liegt der Hebel O, wie es die Figur zeigt, so geht der polarisirende Strom des Elementes S durch die Zersetzungszelle Z durch M, Metallhebel K, Feder, Klemmschraube H, während das Galvanometer G ausgeschaltet ist; dreht man den Hebel so, dass er an c anliegt, so ist das Element S ausgeschaltet und der Polarisationsstrom geht durch Galvanometer G, Draht L, Klemmschraube und Feder I und Hebel K.

Uebung 1. Man schaltet in einen der Apparate (Fig. 281 und 282) als Polarisationszelle einen Glastrog mit verdünnter Schwefelsäure zwischen Platinplatten ein, leitet den Strom kurze Zeit hindurch,

schaltet um; das Galvanometer giebt einen starken, schnell abnehmenden Ausschlag. Man kann daher solche Polarisationszellen nicht zur Erzeugung von anhaltenden Strömen benutzen.

Uebung 2. Man macht denselben Versuch mit zwei Bleiplatten, die in verdünnte Schwefelsäure tauchen; der Polarisationsstrom hält

Fig. 282.



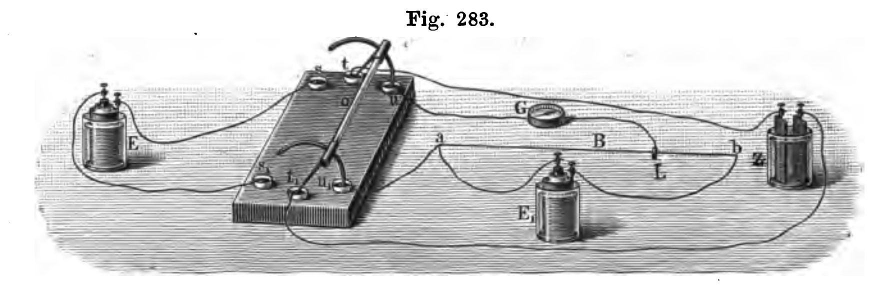
hier lange an, und zwar im Princip so lange, bis alles durch den polarisirenden Strom erzeugte Bleisuperoxyd sich wieder in Blei durch den von dem Polarisationsstrome ausgeschiedenen Wasserstoff verwandelt hat (vergl. S. 354). Man hat einen Accumulator.

2. Elektromotorische Kraft der Polarisation.

Princip. Die Bestimmung der elektromotorischen Kraft geschieht nach der Compensationsmethode (vgl. S. 395).

Apparat. Der Strom der polarisirenden Kette E (Fig. 283) geht zu den Näpfen s und s_1; liegt der Bügel o in der der in Fig. 283 ge-

Fig. 283.



zeichneten Lage entgegengesetzten, so fliesst der Strom durch die Polarisationszelle Z. Legt man den Bügel um, so sind die Pole von Z verbunden, und zwar der eine positive direct mit dem einen Ende a des Messdrahtes der Wheatstone'schen Brücke B, der andere negative durch ein Galvanometer G mit dem Schleifcontact L auf dem Mess-

draht. Von den Enden a und b führen ausserdem Drähte zu den Polen der constanten Kette E_1. In die Zersetzungszellen Z werden gebracht: a) verdünnte Schwefelsäure, b) concentrirte Salpetersäure, c) Chromsäurelösung zwischen Platinplatten.

Uebung 1. Die elektromotorische Kraft der Polarisation wird für Platinplatten in verdünnter Schwefelsäure bestimmt.

1) Man polarisirt die Platinplatten in verdünnter Schwefelsäure.

2) Man legt schnell den Bügel um, während der Schleifcontact L ziemlich weit gegen b hin geschoben und auf den Draht gedrückt ist. Tritt ein Ausschlag am Galvanometer ein, so rückt man L von b nach a hin, bis die Nadel in Ruhe ist.

3) Man polarisirt von Neuem, legt um und verschiebt L, bis wieder kein Ausschlag eintritt, und liest ab.

4) Man schiebt L beliebig weit nach a hin; es tritt kein Ausschlag des Galvanometers ein. Der sich von dem Hauptstrom abzweigende Nebenstrom wird eben stets an den Platten in Z eine Polarisation hervorrufen, deren elektromotorische Kraft gleich und entgegengesetzt der erregenden ist.

5) Man schaltet statt der Polarisationszelle ein Normalelement ein.

Berechnung. Aus diesen Messungen erhält man nach S. 397 die elektromotorische Kraft der Polarisation.

Bemerkung. Wendet man als polarisirende Kette drei oder mehr hinter einander geschaltete Bunsen'sche Elemente an, so erreicht die Polarisation ein Maximum, welches etwa gleich 2 Volt ist.

Uebung 2. Derselbe Versuch wird mit den beiden anderen Zersetzungszellen angestellt. Am kleinsten ist die elektromotorische Kraft der Polarisation bei Salpetersäure, am grössten bei Schwefelsäure.

Uebung 3. Die drei unter a) b) c) aufgeführten Zersetzungszellen werden hinter einander in den Schliessungskreis einer Säule von drei bis vier Bunsen'schen Elementen geschaltet. In a findet lebhafte Wasserstoffabscheidung statt, eine weit geringere in b und c. In b entwickeln sich Dämpfe von Untersalpetersäure in Folge der Reduction der Salpetersäure, c färbt sich grün in Folge der Reduction der Chromsäure.

Bemerkung. Inconstanz der Ketten. Durch die Polarisation ist die Abnahme der elektromotorischen Kraft der Elemente, also deren Inconstanz, bedingt. Der Strom zerlegt die Leiter zweiter Classe in einer Kette gerade ebenso, wie diejenigen in einem Voltameter. Die durch die abgeschiedenen Substanzen bedingte elektromotorische Kraft ist derjenigen der Kette selbst entgegengesetzt und schwächt sie daher. Besonders nachtheilig ist die durch den Wasserstoff erzeugte Polarisation. Bei den constanten Ketten wird daher möglichst dafür gesorgt,

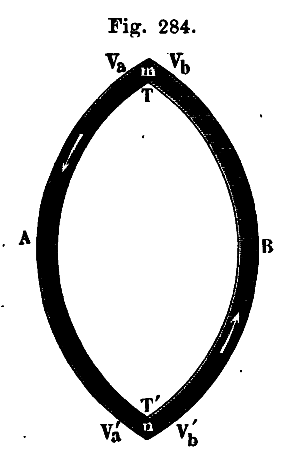
dass die abgeschiedenen Ionen, vor Allem der Wasserstoff, fortgeschafft werden, resp. dass die Ionen solche sind, dass durch sie keine Polarisation hervorgerufen wird (vgl. oben). Zum Entfernen des Wasserstoffs dienen starke Oxydationsmittel, Chromsäure, Salpetersäure, Mangansuperoxyd, die dabei selbst reducirt werden. Ionen, die keine Polarisation hervorrufen, treten auf bei dem Daniell'schen Element, es scheidet sich auf der Kupferplatte Kupfer, bei dem Latimer Clark-Element (vergl. S. 353) scheidet sich Quecksilber ab.

VIII. Thermoelektricität.

Gebraucht wird: Kupfer-Wismuth- und Kupfer-Antimonbügel (Fig. 280); Brenner. Thermoelement (Fig. 281), Brenner; Galvanometer mit Magnetstab zum Astasiren; Commutator; Leitungsdrähte; Coordinatenpapier; Eisen-Kupferelement; 1 mm starker Eisendraht; Klemmschrauben; Milliampèremeter.

Einleitung. Berühren sich zwei verschiedene Leiter A und B (Fig. 284) an ihren Enden und erwärmt man die eine der beiden Berührungsstellen (Löthstellen), während man die andere auf constanter Temperatur erhält, so entsteht ein galvanischer Strom, der die beiden Leiter in einem bestimmten Sinne durchfliesst. Kühlt man die eine Löthstelle unter die Temperatur der anderen ab, so fliesst der Strom im entgegengesetzten Sinne, wie beim Erwärmen. Haben demnach die Berührungsstellen zweier Leiter verschiedene Temperaturen, so treten thermoelektromotorische Kräfte E auf, die einen Strom, Thermostrom, hervorrufen, der durch die wärmere und die kältere Stelle in einem bestimmten Sinne von der einen Substanz zu der anderen fliesst. Als Leiter nimmt man gewöhnlich Metalle. Thermoelement nennt man die Verbindung zweier Leiter, die bei verschiedener Temperatur der Löthstellen einen Strom liefert. Die Intensität des Stromes i ist wie die des hydroelektrischen bestimmt durch das Ohm'sche Gesetz (S. 348):

Fig. 284.



$$i = E/w = E/(w_i + w_a).$$

Da der Widerstand w_i im Thermoelement sehr klein ist, so hängt die Aenderung der Intensität des Thermostromes bei nicht zu kleinem, constantem äusseren Widerstande w_a fast nur von der Aenderung der thermoelektromotorischen Kraft ab; sie ist bestimmt durch die Natur der sich berührenden Leiter A und B und durch die Temperaturen t_1 und t_2 der beiden Löthstellen. Ist die Temperaturdifferenz der beiden Löthstellen nicht gross, so ist die elektromotorische Kraft E ihr nahe proportional:

$$E = c\ (t_2 - t_1).$$

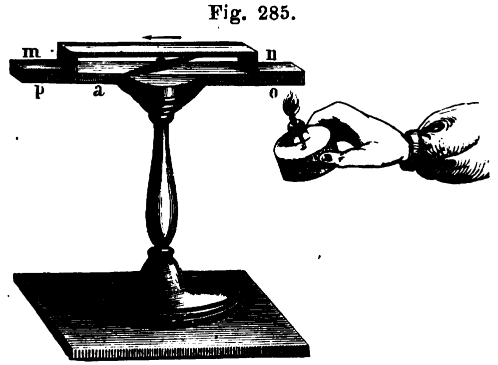
c ist die thermoelektromotorische Kraft, die bei der Temperaturdifferenz von einem Grade auftritt.

Leiten wir den Strom eines Thermoelemetes durch ein Spiegelgalvanometer, so sind die Ausschläge desselben angenähert proportional der Intensität des Stromes, also angenähert proportional der thermoelektromotorischen Kraft, bezw. der Temperaturdifferenz der beiden Löthstellen.

1. Vorübung.

Apparat. Auf den Wismuthstab *po* (Fig. 285) ist der Kupferbügel *mn* gelöthet; unter diesem schwebt eine Magnetnadel auf einer Spitze. Bei einem anderen Apparat ist der Wismuthstab durch einen Antimonstab ersetzt.

Fig. 285.



Uebung. 1) Man stellt den Apparat so auf, dass der Wismuthstab und der Kupferbügel der Magnetnadel parallel laufen.

2) Man erwärmt langsam die eine Löthstelle, die Nadel schlägt immer stärker aus; man bestimmt nach der Ampère'schen Regel (vergl. S. 368) die Stromrichtung: Der Strom geht an der heissen Löthstelle vom Wismuth zum Kupfer.

3) Man lässt die erwärmte Löthstelle abkühlen und erwärmt die andere. Man bestimmt die Stromrichtung: Der Strom geht wieder an der heissen Löthstelle von dem Wismuth zum Kupfer.

4) Man wiederholt dieselben Versuche mit dem Kupfer-Antimonbügel: Der Ausschlag ist viel stärker, der Strom geht an der erwärmten Stelle vom Kupfer zum Antimon.

Man findet also: Die Stärke und Richtung des Thermostromes hängt von der Natur der sich berührenden Leiter und von dem Temperaturunterschiede der Berührungsstellen ab.

(Daraus, dass im zweiten Falle diese Ausschläge viel grösser sind als im ersten, lässt sich kein Schluss auf eine grössere elektromotorische Kraft im zweiten ziehen, da der innere Widerstand im zweiten Falle kleiner ist als im ersten.)

2. Bestimmung der Temperatur mit dem Thermoelement.

Princip. Bei der Benutzung des Thermoelementes zu Temperaturmessungen hält man die eine Löthstelle auf constanter Tempe-

ratur t_0, bringt die andere mit dem Körper in Berührung, dessen Temperatur t man messen will, und misst die Stärke des Thermostromes mit dem Galvanometer.

Um die Temperaturen in Celsiusgraden zu erhalten, muss man das Thermoelement aichen. Dies geschieht dadurch, dass man für eine Reihe von Temperaturen t die Ausschläge des Galvanometers α bestimmt und entweder beide Grössen in einer Tabelle zusammenstellt oder dass man ihre gegenseitige Abhängigkeit durch eine Curve oder Formel darstellt.

Fig. 286.



Gilt in dem Temperaturintervall, um das es sich handelt, die Gleichung $E = c\ (t - t_0)$, so ist der Galvanometerausschlag

$$\alpha = \gamma\ (t - t_0) \quad \text{und} \quad t - t_0 = \alpha / \gamma, \quad t = t_0 + \alpha / \gamma.$$

Die Constante γ, d. h. den Zuwachs des Ausschlages für die Aenderung der Temperatur um einen Grad, erhält man, wenn man für irgend eine bekannte Temperaturdifferenz $t - t_0$ den Ausschlag α bestimmt und ihn durch $t - t_0$ dividirt.

Apparat. Das Thermoelement (Fig. 286) besteht aus einem circa 3 mm dicken Neusilberdraht, der bei a und b mit je einem ebenso starken Kupferdraht verlöthet ist; die beiden Kupferdrähte tragen bei c und d Klemmschrauben; über die verticalen Enden der Kupferdrähte sind bei a und b Glasröhren geschoben, welche bis an die Löthstellen reichen. Die Löthstellen a und b werden in mit Paraffinöl gefüllte Reagirröhren getaucht. Sie werden in die mit Wasser gefüllten Blechgefässe A und B gesenkt. In jedes derselben taucht ein Thermometer. Beim Gebrauche werden A und B auf Dreifüsse gestellt und das die Drähte tragende Brett C in entsprechender Höhe festgestellt.

Zu den Beobachtungen dient ein empfindliches Spiegelgalvanometer, dessen Windungen man am besten neben einander schaltet, damit sein innerer Widerstand möglichst klein wird.

Uebung 1. Aichen des Thermoelementes. 1) Man stellt Galvanometer und Fernrohr mit Scala auf (S. 404), und astasirt.

2) Man füllt die Reagirröhren mit Paraffinöl, die Gefässe A und B mit Wasser und setzt das Thermoelement zusammen.

3) Man verbindet die Klemmschrauben c und d mit dem Galvanometer. Sind die Temperaturen in A und B gleich, so erhält man keinen Ausschlag.

4) Man erwärmt A langsam, hält durch Reguliren der Flamme die Temperatur von Zeit zu Zeit eine Weile constant und liest ab:

Die Temperatur in A: t_a, die Temperatur in B: t_b, den Ausschlag des Galvanometers: α.

5) Man erhitzt bis zum Sieden, liest ab und nimmt die Flamme fort. Auch bei sinkender Temperatur stellt man wie unter 4) eine Reihe von Messungen an. Durch Untersetzen und Reguliren der Flamme erhält man dabei die Temperatur eine Zeit lang constant.

6) Man bildet für alle Ablesungen $t_a - t_b$ und zeichnet eine Curve, wobei man $t_a - t_b$ als Abscissen, die zugehörigen α als Ordinaten wählt.

Uebung 2. Messung der Temperatur. 1) Man erwärmt A auf eine beliebige Temperatur, beobachtet den Galvanometerausschlag α und liest die Temperatur t_a in A und t_b in B ab.

2) Man geht in einer der Grösse von α entsprechenden Ordinate der Curventafel entlang, bis man die Curve trifft; der zugehörige Abscissenwerth, bei dem dies eintritt, sei t. Dann ist $T = t + t_b$ die Temperatur in A während der Beobachtung. Es muss $T = t_a$ sein.

Bemerkung. Aus dem Verlaufe der Curve erkennt man, inwieweit man $E = c\,(t - t_0)$ setzen kann; dies ist nur möglich innerhalb der Temperaturintervalle, innerhalb deren die Curve geradlinig verläuft.

Die Messung der Temperatur mit Thermoelementen findet u. a. bei sehr hohen Temperaturen Anwendung.

3. Abweichungen von dem Gesetze $E = c\,(t - t_0)$.

Uebung. 1) Man verbindet ein Thermoelement aus einem Eisen- und einem hart angelötheten Kupferdrahte mit dem Galvanometer.

2) Man erwärmt die Löthstelle mit dem Bunsenbrenner und verfolgt den Ausschlag. Derselbe wächst erst sehr rasch, dann langsamer, bleibt einen Moment constant, nimmt wieder ab, wird Null und geht nach der entgegengesetzten Seite.

3) Man entfernt den Brenner und lässt die Löthstelle abkühlen; man beobachtet den umgekehrten Verlauf des Ausschlages.

Die thermoelektromotorische Kraft des Eisen-Kupferelementes nimmt mit steigender Temperatur der einen Löthstelle erst zu, dann ab, wird Null und kehrt sich darauf um.

Thermoelemente, die ein derartiges Verhalten zeigen, gehorchen offenbar nicht dem Gesetze der Proportionalität und sind selbstverständlich nicht zu Temperaturmessungen zu benutzen.

4. Bestimmung der elektromotorischen Kraft eines Thermoelementes in absolutem Maasse.

Princip. Nach dem Ohm'schen Gesetze ist $E = i\,W$. Man ermittelt den einer bestimmten Temperaturdifferenz entsprechenden Ausschlag eines geaichten Galvanometers, einmal mit und dann ohne einen vorgeschalteten Widerstand W_1. Der unbekannte Widerstand von Galvanometer, Thermoelement und Zuleitungsdrähten sei W_0. Der Ausschlag von einem Scalentheil des Galvanometers entspreche einem Strome von C Ampères. Bei einer bestimmten Differenz der Temperaturen t_n und t_0 sei der Ausschlag ohne Einschaltung von $W_1 : s_n$, mit Einschaltung von $W_1 : s_n'$, dann ist:

$$E = C s_n W_0, \qquad E = C s_n' (W_0 + W_1),$$

also

$$E = C \,.\, W_1 \frac{s_n s_n'}{s_n - s_n'}, \qquad W_0 = W_1 \frac{s_n'}{s_n - s_n'}.$$

Uebung. 1) Die Aichung des Galvanometers geschieht z. B. durch Einschalten desselben zugleich mit einem Milliampèremeter in den Stromkreis (vergl. S. 365).

2) Die durch den Thermostrom erzeugten Ausschläge des Galvanometers werden bei verschiedenen Temperaturdifferenzen gemessen.

Man liest unter Benutzung eines Commutators (S. 358) die Ausschläge nach rechts und links ab und nimmt das Mittel. Die Ausschläge werden mit und ohne Einschaltung des Widerstandes W_1 bestimmt.

Beispiel: Neusilber-Kupferelement. Temperaturen der Löthstellen $t_0 = 10^0$ und $t_n = 70^0$. Stromstärke für den Galvanometerausschlag von 1 mm $6{,}7 \,.\, 10^{-6}$, $W_1 = 2\,\Omega$, $s_n = 56$, $s_n' = 31$, dann folgt $E_{70,10} = 941 \,.\, 10^{-6}$ Volt. Für 1^0: $E_{10} = 15{,}7 \,.\, 10^{-6}$ Volt $= 15{,}7$ Mikrovolt.

Absolute Bestimmungen der thermoelektrischen Kräfte ergaben, wenn die Löthstellen auf 0^0 und 100^0 erhalten wurden:

Rhodiumplatin-Platin	$0{,}0_3 7897$ Volt	Eisen-Kupfer	$0{,}0_2 10925$ Volt
Rhodiumplatin-Kupfer	$0{,}0_3 1986$ „	Eisen-Platin	$0{,}0_2 16842$ „
Eisen-Rhodiumplatin	$0{,}0_3 8945$ „	Kupfer-Platin	$0{,}0_3 5917$ „

Aeltere Bestimmungen ergeben ungefähr:

Wismuth-Kupfer	0,0042 Volt	Kupfer-Neusilber	0,0012 Volt
Eisen-Neusilber	0,0001 „		

IX. Bestimmung der Dielektricitätsconstante.

Gebraucht wird: Kohlrausch's Condensator; Glasstab mit Reibzeug; Glas- und Paraffinplatte; Nernst'scher Apparat mit Zubehör.

Einleitung. Verbindet man eine Elektricitätsquelle von bestimmtem Potential V, etwa den einen Pol einer galvanischen Batterie, mit einem beliebigen Leiter, so nimmt derselbe eine bestimmte Elektricitätsmenge E auf, die dem Potential V proportional ist. Das heisst, es ist, wenn C eine Constante ist:

$$E = C.V, \quad C = E/V.$$

Die bei dem Potential Eins sich auf dem Leiter anhäufende Elektricitätsmenge C heisst seine Capacität.

Die Capacität hängt ab von der Gestalt und den Dimensionen des Leiters und von einer Eigenschaft des umgebenden isolirenden Mediums; die diese Eigenschaft bestimmende Grösse heisst Dielektricitätsconstante D[1]) (Dielektrica heissen die Nichtleiter oder Isolatoren). Die Capacität ist unter sonst gleichen Bedingungen proportional der Dielektricitätsconstante.

Für eine Kugel vom Radius r, die sich in Luft, die die Dielektricitätsconstante $D = 1$ hat, befindet, ist die Capacität proportional dem Radius, also

$$C = kr,$$

k selbst hängt von der Wahl der Einheiten ab.

Nähert man einem Leiter L, der mit einer Elektricitätsquelle verbunden ist, einen zweiten, isolirten oder zur Erde abgeleiteten, d. h. auf dem Potential Null erhaltenen L_1, so wird die Capacität des ersteren vergrössert. Man nennt eine solche Anordnung einen Condensator und spricht von der Capacität eines Condensators. Die Capacität des Condensators ist proportional der Dielektricitätsconstante der Substanz zwischen L und L_1.

Ein specieller Fall des Condensators ist der Plattencondensator von R. Kohlrausch (Fig. 287). Zwei von isolirenden Säulen getragene Metallplatten A und B können einander genähert und von einander entfernt werden. Mit B sei ein kleines Hollundermarkelektroskop, ein Metallstab m, an dessen Ende an einem Faden eine leichte Hollundermark-

[1]) Durch die Dielektricitätsconstante D eines Mediums ist auch die Anziehung zweier in ihm befindlichen elektrischen Mengen e und e_1 bestimmt; sie ist derselben umgekehrt proportional.

kugel λ herabhängt, verbunden. Ist der Abstand von A und B **nicht** gross, so ist die Capacität des Condensators, wenn die Oberfläche der Kreisscheibe S, der Abstand der Platte c ist, bei abgeleitetem A:

$$C = \frac{DS}{4\pi c}.$$

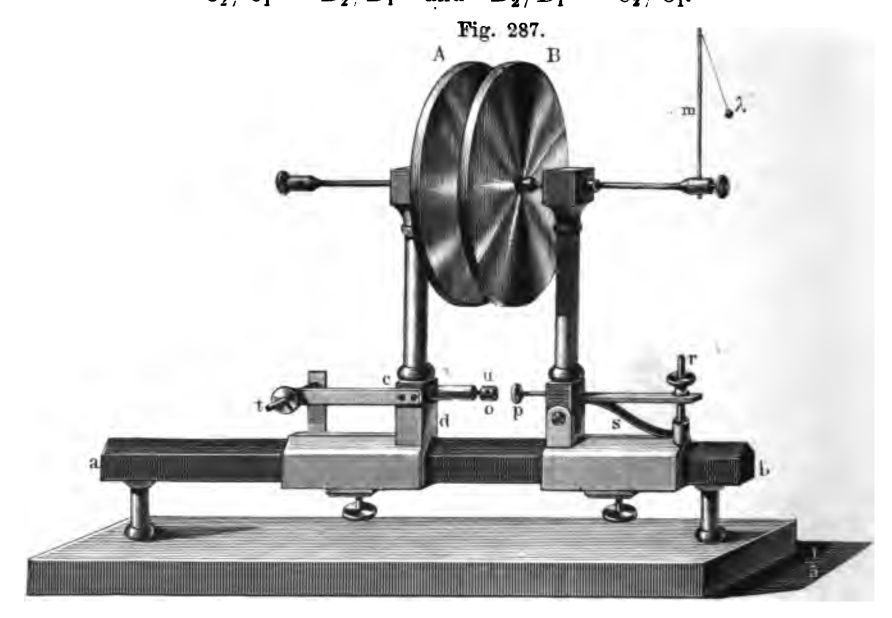
Bestimmt man die Capacitäten C_1 und C_2, wenn zwischen den ungeänderten Condensatorplatten sich Substanzen mit den Dielektricitätsconstanten D_1 und D_2 befinden, so ist

$$C_1 = D_1 S / 4\pi c \quad \text{und} \quad C_2 = D_2 S / 4\pi c,$$

also

$$C_2 / C_1 = D_2 / D_1 \quad \text{und} \quad D_2 / D_1 = C_2 / C_1.$$

Fig. 287.



Ist im ersten Falle das Zwischenmedium Luft mit $D_1 = 1$, so ist

$$D_2 = C_2 / C_1$$

und man findet die Dielektricitätsconstante D_2 aus dem Verhältnisse zweier Capacitäten.

Vorübung. 1) Man lädt B während A von B weit absteht durch Berühren mit einem geriebenen Glasstabe. Die Hollundermarkkugel zeigt einen bestimmten Ausschlag, der das Potential von B misst.

2) Man nähert die abgeleitete Platte A an B. Die Kugel λ sinkt, man muss offenbar neue Elektricitätsmengen auf B bringen, damit der Ausschlag von λ, also das Potential, das frühere wird. Die Capacität ist grösser.

3) Man nähert A weiter, der Ausschlag wird immer kleiner, d. h. die Capacität wird mit abnehmendem Abstande immer grösser.

4) Man schiebt zwischen A und B Platten aus Glas, Paraffin etc. ein, der Ausschlag von λ wird kleiner, als wenn Luft zwischen A und B sich befindet, die Capacität ist nach 2) also grösser; da aber die Dimensionen des Apparates ungeändert bleiben, so ist die Dielektricitätsconstante des Zwischenmediums grösser.

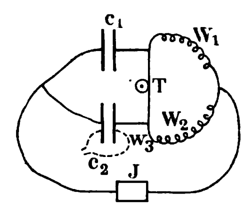
Bemerkung. Diese Anordnung wird, in passender Weise verändert, zur Messung von Dielektricitätsconstanten benutzt.

Methode zur Bestimmung der Dielektricitätsconstante nach W. Nernst.

Zu physikalisch-chemischen Zwecken dient in neuerer Zeit besonders die folgende von W. Nernst ausgearbeitete, der Kohlrausch-schen Form der Widerstandsbestimmung entsprechende Methode, die eine der Wheatstone'schen ähnliche Anordnung darstellt.

Princip der Methode. In Fig. 288 sei J ein kleines Inductorium, w_1 und w_2 zwei inductionsfreie Widerstände, c_1 und c_2 zwei gut isolirende Condensatoren von den Capacitäten c_1 und c_2, T ein Telephon. Das Telephon schweigt nur dann, wenn

Fig. 288.



$$w_1 : w_2 = c_2 : c_1 \text{ ist.}$$

Macht man $w_1 = w_2$, richtet den einen Condensator (c_2 etwa) veränderlich (als Messcondensator) ein, so gestattet diese Methode, bei c_1 eingeschaltete Capacitäten mit einander zu vergleichen, also auch die Dielektricitätsconstante zu bestimmen. Ist a die Capacität des Messcondensators, wenn bei Einschaltung eines Luftcondensators c_1 das Telephon schweigt, b die Einstellung für denselben Condensator, wenn er mit einer isolirenden Substanz von der Dielektricitätsconstante D_x gefüllt ist, so ist:

$$\frac{b}{a} = D_x.$$

Die Methode giebt schlechte Resultate oder versagt, wenn die Substanzen, deren D zu ermitteln ist, auch nur spurenweise leiten. Man kann mit ihr aber auch für schwach leitende Substanzen richtige Zahlen erhalten, wenn man zur Compensation der Leitfähigkeit des Condensators c_1 dem zweiten, dem Messcondensator, ebenfalls eine entsprechende Leitfähigkeit durch einen gestrichelt angedeuteten veränderlichen Nebenschluss w_3 ertheilt.

Ist w_4 der Leitungswiderstand des Condensators c_1, so kommt jetzt das Telephon zum Schweigen, wenn sowohl

$$c_1 = c_2 \quad \text{als auch} \quad w_3 = w_4 \text{ ist.}$$

Im Telephon beobachtet man entsprechend sowohl ein (Capacitäts-)

Minimum, wenn durch Einstellung des Condensators $c_1 = c_2$, als auch ein (Widerstands-) Minimum, wenn durch Einstellung des Nebenschlusses w_3 $w_3 = w_4$ ist.

Apparat: Als Stromquelle dient ein kleiner Inductionsapparat, dessen Unterbrecher eine kurze, lose gespannte Drahtsaite von 10 bis 12 cm bildet. Die Saite muss beim Functioniren einen leisen Rasselton hören lassen. Die elektrolytischen Verzweigungswiderstände w_1 und w_2 sind mit der Inductionsrolle fest verbunden, zwei verticale Glasröhren von etwa 13 cm Höhe, 0,5 cm Weite, mit einer unteren eingeschmolzenen und einer oberen verschiebbar befestigten, gut platinirten Platinelektrode. Als Füllungsflüssigkeit dient zweckmässig eine Lösung von 181 g Mannit, 62 g Borsäure in 1,5 Liter Wasser, weil dieselbe einen sehr kleinen Temperaturcoëfficienten hat. Der Messcondensator besteht aus zwei starken rechteckigen Messingplatten von etwa 8 cm Höhe, 12 cm Länge. Die Capacität wird durch Einschieben einer mit Nonius versehenen Glasplatte vergrössert, und zwar nahezu proportional den am Nonius abgelesenen Verschiebungen der Glasplatte. Kleine Abweichungen von diesem Gesetze wegen der verschiedenen Dicke der Glasplatte etc., corrigirt man ein- für allemal durch einmaliges Calibriren des Condensators (s. w. u.).

Fig. 289.

Fig. 290.

Zur Compensation der Leitfähigkeiten der untersuchten Flüssigkeiten innerhalb weiter Grenzen sind zwei elektrolytische Nebenschlusswiderstände (Fig. 289) dem Messcondensator parallel geschaltet, eine enge Röhre r_1 und eine weite r_2, deren eine gemeinschaftliche Elektrode e eingeschmolzen ist, während die beiden anderen mittelst Theilung und Trommelschraube messbar verschoben werden können.

Die zu untersuchende Flüssigkeit wird in das dazu bestimmte Gefäss, Fig. 290, (Messgefäss) eingefüllt. Die Capacität des Troges wird (ähnlich wie bei Widerstandsbestimmungen) durch Aichung mittelst einer Flüssigkeit von bekannter D (gut gereinigter Aether $D = 4{,}12$ Benzol $D = 2{,}258$). Das kleine Dosentelephon ist mit einer isolirenden Handhabe versehen, weil jede Ableitung hier wie überhaupt an der Leitung ein Nebengeräusch verursacht.

Versuchsanordnung: Messcondensator wie Compensationswiderstände werden zweckmässig sowohl bei c_1 wie bei c_2 angewendet und das Messgefäss abwechselnd dem einen und dem anderen Messcondensator parallel geschaltet. Dadurch erhält man die Capacität des Troges im leeren und gefüllten Zustande direct in Scalentheilen der Verschiebung der Glasplatten und die Genauigkeit ist, weil man doppelt misst, entsprechend grösser.

Die Versuchsanordnung ist demnach (Fig. 291) folgende:

J ist ein Inductorium; W_1 und W_2 die Verzweigungswiderstände; W_3 und W_4 die Nebenschlusswiderstände; c_1 und c_2 die Messcondensatoren; C das zur Aufnahme der zu untersuchenden Substanzen dienende Gefäss, das durch die Contacte e_1 und e_2 bald zu c_1, bald zu c_2 geschaltet wird.

Uebung 1. Gleichmachen der Widerstände W_1 und W_2.

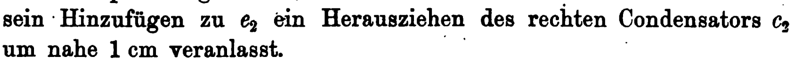
1) Man entfernt den Trog und die Widerstände W_3 und W_4, macht der Schätzung nach W_1 gleich W_2 und verändert die Messcondensatoren, bis ein Minimum im Telephon eintritt.

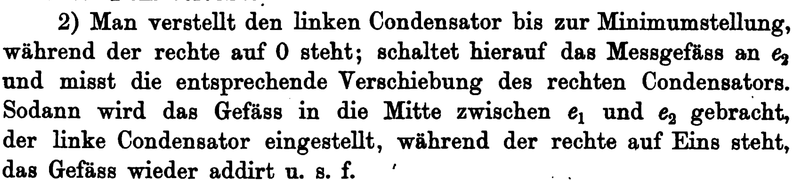
2) Man schaltet die Leitungen um, so dass W_2 mit O_1 und W_1 mit O_2 verbunden ist. Man ändert dann theils die Widerstände W_1 und W_2, theils die Condensatoren, bis wieder ein Minimum eintritt. In dieser Weise fährt man mit Umschalten und Einstellen fort, bis beim Umschalten keine Aenderung der Minimumstellung des Condensators nöthig ist.

Fig. 291.

Uebung 2. Calibrirung des Messcondensators.

1) Das leere Messgefäss wird mittelst eines Glasplättchens von geeigneter Dicke (etwa 1 mm) auf solche Capacität gebracht, dass sein Hinzufügen zu e_2 ein Herausziehen des rechten Condensators c_2 um nahe 1 cm veranlasst.





2) Man verstellt den linken Condensator bis zur Minimumstellung, während der rechte auf 0 steht; schaltet hierauf das Messgefäss an e_2 und misst die entsprechende Verschiebung des rechten Condensators. Sodann wird das Gefäss in die Mitte zwischen e_1 und e_2 gebracht, der linke Condensator eingestellt, während der rechte auf Eins steht, das Gefäss wieder addirt u. s. f.

Würde der rechte Condensator ohne Caliberfehler sein, so müsste der Addition des Gefässes stets die gleiche Verschiebung (nämlich nahe 1 cm) entsprechen; aus den Abweichungen ergeben sich sofort die Correctionen für den Scalenwerth.

3) Man ermittelt dann durch Vergleich mit dem rechten Condensator den Scalenwerth des linken.

Uebung 3. Bestimmung von Dielektricitätsconstanten.

1) Man stellt den leeren Trog C in die Mitte zwischen e_1 und e_2, stellt den rechten Condensator auf 0 und verändert den linken, bis im Telephon ein Tonminimum eintritt.

2) Man verändert die Nebenschlusswiderstände W_3 und W_4, bis das Telephonminimum möglichst scharf ausgebildet ist.

3) Man schaltet den Trog an e_2, verschiebt die rechte Glasplatte, bis wiederum ein Minimum eintritt. Condensatorstellung s_2.

4) Man wiederholt die Messung in derselben Weise, indem man das Gefäss an e_1 anlegt. Condensatorstellung s_1.

5) Man füllt den Trog mit der Aichungsflüssigkeit und bestimmt wieder die Condensatoreinstellungen σ_2 und σ_1, am rechten und linken Messcondensator.

6) Man füllt das Gefäss mit der zu verwendenden Flüssigkeit und ermittelt in der gleichen Weise die Condensatoreinstellungen S_2 und S_1. Ist das Telephonminimum verwaschen, die Einstellung ungenau, so leitet die Flüssigkeit und man hat durch Veränderung des Nebenschlusses W_3 oder W_4 diese Leitfähigkeit zu compensiren, bis ein scharf ausgeprägtes Minimum zu hören ist.

Berechnung: Wenn D_0 die Dielektricitätsconstante für die Aichungsflüssigkeit, $s = \frac{s_2 + s_1}{2}$ die Verschiebung des Messcondensators für den leeren, $\sigma = \frac{\sigma_2 + \sigma_1}{2}$ für den mit der Aichungsflüssigkeit gefüllten Trog bedeutet, so ergiebt sich die Dielektricitätsconstante einer anderen Substanz, die eine Verschiebung $S = \frac{S_2 + S_1}{2}$ liefert:

$$D = (D_0 - 1)\,\frac{S - s}{\sigma - s} + 1.$$

Beispiel: Die corrigirten Werthe sind $s_2 = 12{,}3$; $s_1 = 13{,}7$; $s = 13$. Als Aichungsflüssigkeit diente Benzol, $D = 2{,}258$. Die corrigirten σ Werthe sind $\sigma_2 = 25{,}3$, $\sigma_1 = 27{,}6$, also $\sigma = 26{,}4$. Für Aether wurde gefunden $S_2 = 49{,}3$, $S_1 = 52{,}7$, also $S = 52{,}0$.

$$D_{\text{Aether}} = 1{,}258\,\frac{51 - 13}{26{,}4 - 13} + 1 = 4{,}5.$$

Allgemeines. Nach den oben besprochenen und anderen Methoden ist für eine grosse Anzahl von Körpern die Dielektricitätsconstante D bestimmt worden.

Aus der Faraday'schen Anschauung, dass zwei elektrische Theilchen nicht durch eine Fernkraft auf einander wirken, sondern durch Vermittelung eines zwischen ihnen befindlichen Mediums hat Maxwell den Satz abgeleitet, die Dielektricitätsconstante D ist gleich dem Quadrate des Brechungsindex n, also:

$$D = n^2.$$

Dadurch wurde eine Beziehung zwischen elektrischen und optischen Erscheinungen begründet.

Der Brechungsindex n bezieht sich auf unendlich lange Wellen; bei Körpern mit geringer Dispersion gilt die Beziehung auch für das n für sichtbare Strahlen, resp. für die Cauchy'sche Constante A, vgl. S. 235. Für solche Körper aber, bei denen die grossen Wellen einen

wesentlich anderen Brechungsindex als die sichtbaren besitzen, müssen erstere direct zur Vergleichung herangezogen werden; dies ist z. B. bei Wasser, Aethyl-, Methylalkohol und anderen Substanzen der Fall.

Das Maxwell'sche Gesetz gilt bei Benutzung der Cauchy'schen Constanten A z. B. in folgenden Fällen:

	D	n^2
Schwefel	3,97	3,89
Paraffin	1,99	2,01
Schweres Flintglas	3,16	3,05
Petroleum	2,07	2,07
Terpentinöl	2,23	2,13

Für einige andere Substanzen sind folgendes die Dielektricitätsconstanten:

Aether: 4, Aethylalkohol: 26, Amylalkohol: 16, Wasser: 80.

In vielen Fällen ist ein Parallelismus zwischen der Grösse der Dielektricitätsconstanten und der dissociirenden Kraft eines Lösungmittels aufgefunden worden; d. h. je grösser die Dielektricitätsconstante eines Lösungsmittels ist, um so weiter sind bei gleicher Concentration Elektrolyte, die in ihm gelöst sind, in ihre Ionen zerfallen.

X. Magnetismus, Elektrodynamik und Elektromagnetismus.

A. Einleitung[1]).

1. Wirkung von Magneten auf Magnete.

Gebraucht wird: Zwei längere aufgehängte Magnete; zwei kürzere Magnete zum Verticalstellen; Hufeisenmagnet; Cartonblätter; Eisenfeile im Gefäss mit Drahtnetz; kurzer Cylinder aus weichem Eisen; Ampère's Stativ; zwei Commutatoren; zwei Chromsäure-Elemente; Stativ mit Buff'schen Spiralen; zwei Solenoide auf Stativen; zwei an Fäden aufgehängte Magnetstäbe; zwei Rahmen mit Drähten; weicher Eisenkern mit Drahtspirale; Stahl- (Strick-) Nadel; Pappkästchen mit kleinen Drahtnägeln; kleine Bussole.

Hängt man einen magnetisirten Stab I frei auf, dass er sich in der Horizontalebene frei bewegen kann, so weist sein eines Ende nach Norden: sein Nordpol, sein anderes Ende nach Süden: sein Südpol. Bestimmt man für einen anderen Stab II Nord- und Südpol, und ermittelt man die Wechselwirkungen zwischen den Enden von Stab I und Stab II, so gilt das Gesetz:

Gleichnamige Pole stossen sich ab, ungleichnamige Pole ziehen sich an.

Man führte die magnetischen Erscheinungen früher darauf zurück, dass an den Polen sich besondere imponderable Fluida „freier Nord- (positiver) und Südmagnetismus (negativer)“, entsprechend der positiven und negativen Elektricität, befänden. In diesem Sinne sprach man und spricht der Bequemlichkeit halber auch noch jetzt, trotzdem sich die Anschauungen wesentlich verändert haben, von magnetischen Mengen, freiem Nord- und Südmagnetismus; statt dieser Ausdrücke kommen nach und nach die Ausdrücke „Stärke eines Magnetpoles“ oder „Polstärke“ in Gebrauch.

Nord- und Südmagnetismus sind in einem Magneten stets in gleichen Mengen ($+\mu$ und $-\mu$) vorhanden (die Polstärken sind einander gleich) und bei langen Stäben nahe an den Enden derselben angehäuft. Auf einen Magneten werden daher von anderen Magneten

---

[1]) Wegen der vielen in Betracht kommenden neueren Begriffe ist in diesem und dem nächsten Abschnitt die Einleitung etwas ausführlicher als sonst gehalten worden.

(und Strömen s. w. u.) zwei entgegengesetzte Kräfte ausgeübt, die ausser Anziehungen und Abstossungen auch Drehungen derselben hervorrufen. Auf einen Stab von der Länge l mit zwei punktförmigen Polen an den Enden von der Stärke μ, der um eine durch seine Mitte gehende, zu seiner Längsrichtung senkrechte Axe drehbar ist, möge ein sehr weit entfernter Pol P wirken, von dem senkrecht zu l stehende Kräfte ausgehen. Ist dann a eine von der Entfernung und Stärke des Poles P abhängige Grösse (die Feldstärke s. unten), so wirken auf die beiden Pole die Drehungsmomente $\frac{1}{2} a \mu l$, zusammen also auf den ganzen Stab das Drehungsmoment $a\mu l = aM$ (S. 40), wo $M = \mu l$ das sog. magnetische Moment ist.

Die Wirkung eines Magnetpoles erstreckt sich auf den ganzen Raum, und zwar mit einer von Ort zu Ort wechselnden Stärke. Man sagt, der Magnetpol erzeugt um sich ein magnetisches Feld. Sind mehrere Magnetpole vorhanden, so liefern diese zusammen ein magnetisches Feld. Statt von den Wirkungen eines Poles zu sprechen, spricht man von denen des magnetischen Feldes. In vielen Fällen ist uns auch nur dieses Feld bekannt, während wir von den dasselbe erzeugenden magnetischen Massen direct nichts wissen, so z. B. bei der Wirkung des Erdmagnetismus.

Die von einem Magnetpol ausgehenden Kräfte können Bewegungen anderer Magnetpole hervorrufen.

Betrachten wir die Wirkung eines Nordpoles auf einen Südpol, der nach allen Richtungen frei beweglich ist, aber doch so, dass er in Folge des Widerstandes des Mediums, in dem er sich bewegt, oder in Folge besonderer Hemmungen nie eine merkliche Geschwindigkeit erlangen kann.

Der Südpol nähert sich dem Nordpol längs einer Curve (in diesem Falle einer geraden Linie), deren Richtung an jeder Stelle mit derjenigen der von dem Nordpol ausgeübten magnetischen Kraft zusammenfällt. Man nennt eine solche Curve auch Magnetkraftlinie. Ein Nordpol bewegt sich auf derselben Curve aber von dem festen Nordpol fort. Ein kleiner, an irgend einer Stelle der Curve befindlicher Magnet stellt sich mit seiner Axe in die Richtung der Kraftlinie ein. Seine Axe giebt also deren Richtung an.

In einem magnetischen Felde werden Eisenstücke, z. B. Eisenspäne, zu Magneten; sie ordnen sich dann in Folge der gegenseitigen Wirkung zu längeren Fäden oder Ketten [1]), die in den Kraftlinien liegen und so deren Verlauf veranschaulichen.

Durch die Einführung der Kraftlinien lassen sich, ganz abgesehen von ihrer theoretischen Bedeutung, vor Allem die Erscheinungen der Induction bequem beschreiben (s. w. u.).

---

[1]) Man kann die Kraftlinien auf dem Papier fixiren, wenn man dasselbe mit einer Lösung von weissem Schellack in Alkohol bestäubt.

Erzeugen zwei oder mehrere gleichnamige oder ungleichnamige Pole das Feld [1]), so haben die Kraftlinien andere, complicirtere Formen.

Offenbar können von einem Magnetpol unendlich viele Kraftlinien ausgehen. Man betrachtet aber von ihnen nur eine bestimmte Anzahl, die man so wählt, dass durch sie die von einem Pol an einer Stelle ausgeübte Kraft in einfacher Weise ausgedrückt wird.

Die Kraft K zwischen zwei Magnetpolen von den in beliebiger Weise gemessenen Polstärken μ_1 und μ_2 in der Entfernung r ist direct proportional μ_1 und μ_2 und umgekehrt proportional r^2, also

$$K = f\,\frac{\mu_1 \mu_2}{r^2}.$$

Der Factor f hängt von der Wahl der Einheiten für μ_1 und μ_2 ab. Als Einheit des freien Magnetismus, der magnetischen Menge, der Polstärke $\mu_1 = 1$, definiren wir diejenige, die in der Entfernung $r = 1$ auf die gleiche Polstärke $\mu_2 = 1$ die Kraft 1 ausübt, dann ist $f = 1$ und [2])

$$K = \frac{\mu_1 \mu_2}{r^2}.$$

Feldstärke H heisst die an der betreffenden Stelle des Feldes auf die magnetische Masse $\mu_2 = 1$, den Einheitspol, und zwar aus Nordmagnetismus, ausgeübte Kraft:

$$H = \mu_1 / r^2.$$

Man wählt nun die Zahl der von einem Pole ausgehenden Kraftlinien so, dass die Feldstärke gleich der Zahl der durch die Flächeneinheit gehenden Kraftlinien ist. Von der magnetischen Masse 1 sollen demnach so viel Kraftlinien ausgehen, dass auch in beliebiger Entfernung r die durch die Flächeneinheit gehende Anzahl von Kraftlinien gleich der Feldstärke ist. Von der magnetischen Masse μ gehen dann μmal so viel Kraftlinien aus.

Von einem Pol μ gehen nach allen Richtungen gleichmässig vertheilt Kraftlinien aus. Im Abstande $r = 1$ ist die auf den Einheitspol ausgeübte Kraft, d. h. die Feldstärke,

$$H = \mu / 1^2 = \mu.$$

Die Kraftlinien vertheilen sich auf der Oberfläche einer Kugel vom Radius $r = 1$, also auf der Oberfläche $O = 4\pi$.

Damit auf die Oberflächeneinheit μ Kraftlinien kommen, müssen

---

[1]) Streng genommen haben wir stets zwei Pole, wir können aber z. B. durch Verwendung sehr langer Magnetstäbe den einen so weit fort verlegen, dass nur die Wirkung des anderen betrachtet zu werden braucht.

[2]) Da hiernach $\mu = \sqrt{K r^2}$ ist, so bestimmt sich die Dimension von μ zu $[\mu] = \left[\sqrt{m l t^{-2} l^2}\right] = [m^{1/2} l^{3/2} t^{-1}]$; dabei ist der Einfluss des Zwischenmediums vernachlässigt.

von dem Pol $4\pi\mu$ ausgehen, von dem Einheitspol also 4π Kraftlinien [1]).

Die Wechselwirkungen von Magnetpolen lassen sich aus den Kraftlinienbildern aus der Annahme ableiten, dass längs den Kraftlinien ein Zug, senkrecht zu denselben ein Druck stattfindet. Durch die einen Nord- und einen Südpol verbindenden Kraftlinien werden dieselben gleichsam gegen einander gezogen, durch die von zwei gleichnamigen Polen ausgehenden und neben einander verlaufenden Kraftlinien werden sie aus einander gestossen. Aus den Kraftlinienbildern (s. w. u.) beliebiger Magnete, Ströme und Magnete, mehrerer Ströme kann man ebenfalls in dieser Weise die bekannten Bewegungserscheinungen direct ableiten.

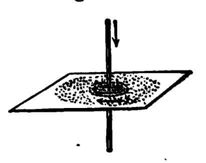
2. Wirkung von Strömen auf Magnete und von Magneten auf Ströme. Kraftlinienfelder von Strömen.

Elektrische Ströme wirken auf Magnete resp. Magnetpole. Während bei Einwirkung eines Magnetpoles auf einen Magneten dieser sich so stellt, dass er nach dem Pole hinweist, stellt er sich nach der Ampère'schen Regel dem Strome gegenüber so ein, dass er senkrecht zu demselben steht.

Die von einem geradlinigen Strome auf einen Magnetpol ausgeübte Kraft liegt also nicht in der Verbindungsrichtung von Strom und Magnet, sondern sie steht senkrecht zu der durch Strom und Magnetpol gelegten Ebene.

Führt man die erstere Einstellung auf die Existenz eines um den Pol entstehenden Kraftlinienfeldes, in dem die Kraftlinien nach dem Pol hinweisen, zurück, so muss auch um den Strom ein von Kraftlinien erfülltes Feld entstehen, die Kraftlinien stehen hier aber senkrecht zum Strome und bilden um denselben geschlossene Kreise, es entsteht ein zu ihm conaxiales Kraftfeld. Ein Magnetpol bewegt sich im Kreise um den Strom, und zwar der Nordpol für einen in der Richtung des Stromes ihn anblickenden Beobachter im Sinne des Uhrzeigers (Fig. 292).

Fig. 292.



Auf ein senkrecht zum Strome stehendes Blatt Papier gestreute Eisenfeile ordnet sich in der That in concentrischen Kreisen an (vergl. Fig. 292 und 296).

Hält man den Magneten fest, und macht den Strom beweglich, so muss nach dem Princip von Action und Reaction der Strom sich bewegen.

Nach der Ampère'schen Regel (vgl. S. 368) wird für einen mit

[1]) Dies ist eine willkürliche, zur Erleichterung der Rechnungen gemachte Festsetzung.

dem Strome Schwimmenden ein Nordpol nach links verschoben. Ist der Strom beweglich, so wird der Strom nach rechts verschoben. Legt man an den Stromträger die rechte Hand mit der Hohlhand nach der Magnetnadel zu in der Richtung des Stromes, so wird der Nordpol in der Daumenrichtung bewegt.

Mit Zuhülfenahme der Kraftlinien lässt sich die Regel für die Bewegung folgendermaassen geben (sog. linke Handregel):

Hält man den Zeigefinger der linken Hand in die Richtung der Magnetkraftlinien des Feldes (vom N- zum S-Pol), den Mittelfinger in die Stromrichtung, so erfährt der Leiter einen Bewegungsantrieb in der Richtung des Daumens.

Auch bei dem Strome können wir an den einzelnen Stellen des ihn umgebenden Raumes von einer Feldstärke sprechen.

Bei einem geraden Leiter, der von einem Strome von der Intensität i durchflossen wird, ist dieselbe im Abstande r von demselben

$$H = 2\frac{i}{r}.$$ [1]

Wie mehrere gleichzeitig vorhandene gleichnamige und ungleichnamige Magnetpole verschieden gestaltete Felder erzeugen, so ist dies auch bei mehreren Strömen der Fall.

Das Feld zweier paralleler gleichgerichteter Ströme giebt Fig. 298, dasjenige paralleler entgegengesetzter Fig. 297, und zwar, wenn die Zeichnungsebene senkrecht zu den Leitern steht. Im ersten Falle legen sich die Kraftlinien als Lemniscaten um die beiden Ströme, im zweiten Falle sind dieselben excentrisch zu den Drahtquerschnitten liegende Kreislinien. Hat der Stromleiter die Gestalt eines Kreises, so werden auf einen im Inneren desselben gelegenen Magnetpol von allen Theilen des Sromes gleichgerichtete Kräfte ausgeübt; ein innerhalb des Stromkreises aufgehängter Magnet stellt sich senkrecht zu der Ebene des Kreises, wenn wir von der Wirkung der Erde absehen (die Stellung bei Berücksichtigung derselben ergiebt sich aus S. 400).

Das Bild der Kraftlinien ist ähnlich dem bei zwei parallelen entgegengerichteten Strömen.

Verbindet man mehrere kreisförmige, so neben einander gelegte Leiter, dass ihre Axen zusammenfallen, so nennt man dies ganze Drahtsystem, wenn es kurz und gedrungen ist, Spule, wenn es lang und gestreckt ist, Solenoid.

Bei einem Solenoid verlaufen die Kraftlinien, wie die Figur (S. 299) zeigt; ihr Verlauf ausserhalb des Solenoides gleicht also sehr demjenigen bei einem Magneten.

In der That sind auch die Wirkungen von Solenoid und Magnet sehr ähnlich (vgl. S. 447).

[1] Die Intensität ist dabei gemessen in Dekaampères (= 10 Ampères), d. i. in elektromagnetischem Maasse.

3. Wirkung von Strömen auf Ströme.

Ampère hat gefunden, dass stromdurchflossene feste Leiter auf bewegliche Ströme Kräfte ausüben; die von ihm aufgestellten Gesetze lauten:

Parallele, gleichgerichtete Ströme ziehen sich an, parallele entgegengerichtete Ströme stossen sich ab, gekreuzte Ströme suchen sich parallel zu stellen. Senkrecht zu einander stehende Ströme wirken nicht auf einander ein. In der gegenseitigen Verlängerung liegende Ströme stossen sich, wenn gleich gerichtet, ab, wenn entgegengesetzt gerichtet, ziehen sie sich an.

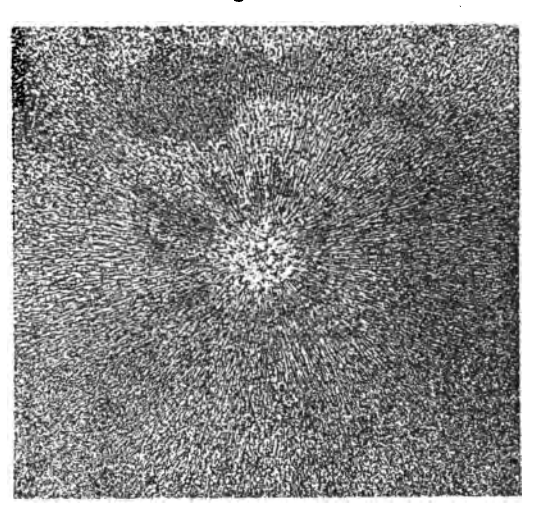
Die Wechselwirkung der parallelen Ströme lässt sich ohne Weiteres aus den Kraftlinienbildern und dem S. 439 Gesagten ableiten.

B. Uebungen.

1. Magnetismus.

Uebung 1. Lage der Pole. Ein Magnetstab wird in Eisenfeilicht getaucht; dieses haftet besonders an den Enden. Der „freie Magnetismus" ist hier besonders stark, die magnetischen Pole liegen nahe an den Enden.

Fig. 293.



Uebung 2. Wirkung von Magnetpolen auf Magnetpole. Von zwei gleichen Magnetstäben wird erst der eine, dann der andere frei aufgehängt, die Nordpole mit Papier bezeichnet und das Gesetz der Anziehung geprüft.

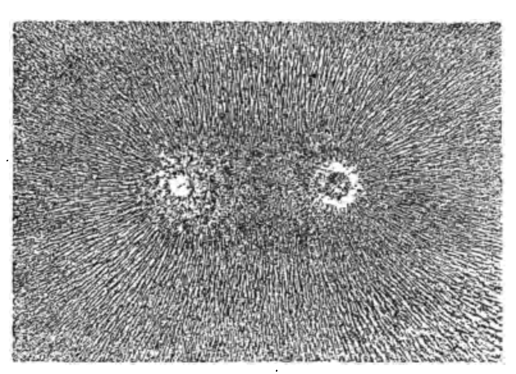
Uebung 3. Gestalt der Kraftlinien. Einer oder beide Magnetstäbe werden vertical aufgestellt, auf die nach oben gerichteten Pole derselben wird ein Blatt glatten Cartons gelegt und auf dieses Eisenfeilicht gebracht, dieselbe ordnet sich in Curven, den Kraftlinien.

Einer der Magnetstäbe wird aufgestellt. Die Gestalt der Kraftlinien ist die Fig. 293 wiedergegebene. An den Polen häuft sich das

[1]) Die Figuren 293 bis 299 sind dem Werke von Benischke, Magnetismus und Elektricität, entnommen.

Eisenfeilicht an, stellt sich zum Theil senkrecht und schräg nach oben, da nach allen Seiten Kraftlinien ausgehen. Das Eisenfeilicht häuft sich besonders an den Rändern der Polflächen an, da an ihnen am meisten freier Magnetismus vorhanden ist.

Fig. 294.



2) Die beiden Magnetstäbe werden neben einander aufgestellt, und zwar in verschiedenen Entfernungen, und zwar so, dass a) gleichnamige Pole nach oben stehen; man erhält Kraftlinien wie Fig. 294; b) ungleichnamige Pole nach oben stehen: man erhält Kraftlinien wie Fig. 295.

3) Ein Magnetstab wird horizontal hingelegt, auf ihn ein Cartonblatt gelegt und Eisenfeilicht gestreut.

4) Für einen Hufeisenmagnet werden die Kraftlinien erzeugt.

5) Die oben benutzten Magnetstäbe werden a) neben einander, b) in ihrer gegenseitigen Verlängerung aufgestellt, so dass 1. ihre gleichnamigen, 2. ihre ungleichnamigen Pole einander zugekehrt sind, und die Kraftlinienbilder erzeugt.

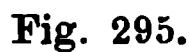
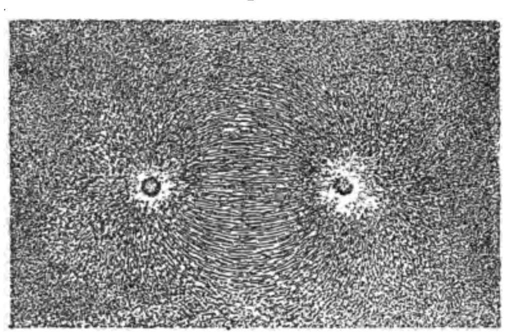


Fig. 295.



Uebung 4. Bestimmung der Polstärke des freien Magnetismus eines Stabes. 1) Auf eine Waage wird ein Magnetstab (ca. 25cm lang) gelegt und gewogen, sein Gewicht sei G gr.

2) Seinem einen Pol μ_1 wird von unten der gleichnamige Pol μ_2 eines ebensolchen, möglichst gleichen Magnetstabes genähert, μ_1 stösst μ_2 ab. Man legt Gewichte auf, bis wieder Gleichgewicht vorhanden ist, das Zusatzgewicht sei γ gr.

3) Man misst den Abstand zwischen μ_1 und μ_2, er sei r cm.

Berechnung und Beispiel [1]). Wir machen die vereinfachenden Annahmen, dass die freien Magnetismen ganz an den Enden der Stäbe

[1]) Bei den zahlreichen vereinfachenden Annahmen kann die Berechnung nur eine Anschauung von der Polstärkebestimmung etc. geben.

concentrirt seien, und dass die Stäbe so lang und ihre Enden einander so nahe seien, dass die Wirkung der einander zunächst liegenden Pole auf einander die aller anderen Pole auf einander überwiegt; weiter sollen die Magnete gleich stark sein, dann ist $\mu_1 = \mu_2$. Die Kraft zwischen μ_1 und μ_2 ist γ gr $= \gamma . 981{,}3$ Dynen oder rund $\gamma . 1000$ Dynen, oder so viel Dynen, als die Kraft Milligramme beträgt. Nach der Formel $K = \mu_1 \mu_2 / r^2$ ist also

$$\mu = r \, . \, \sqrt{\gamma \, . \, 1000.}$$

Bei einem Versuch war $l = 25$, $G = 35$ gr, $r = 4{,}0$, $\gamma = 0{,}160$ gr $= 160$ mgr $= 160$ Dynen (streng $0{,}160 . 981{,}3 = 157$ Dynen). Daraus folgt für die Polstärke $\mu = 4 \, . \sqrt{150} = 4 \, . \, 12{,}6 = 50{,}4$ absolute (C.-G.-S.) Einheiten. — Specifischen Magnetismus nennt man das Verhältniss des magnetischen Momentes zu der Masse des Stabes. Das Moment des obigen Stabes, Länge mal Polstärke, ist $M = \mu l = 50{,}4 \times 25 = 1260$. Der specifische Magnetismus ist also $S = M/G = 1260/35 = 36$.

2. Elektrodynamik.

I. Kraftlinienbilder bei stromdurchflossenen Leitern.

Uebung 1. An zwei verticalen Holzrahmen von 30 cm Länge ist je eine quadratische Drahtspule von ca. 20 übersponnenen Kupfer-

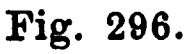


Fig. 296.

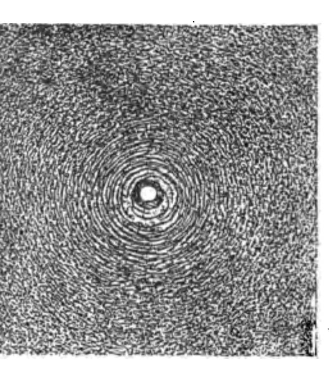
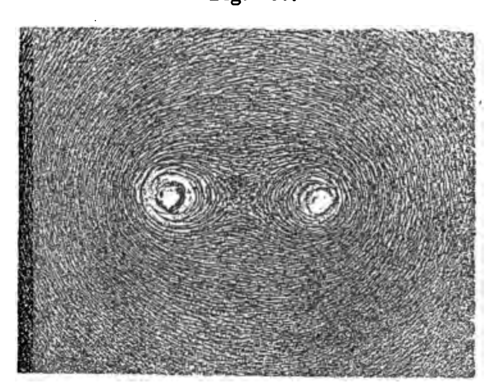


Fig. 297.



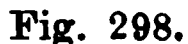
drähten so befestigt, dass die eine senkrechte Seite der Drähte R_1 (resp. R_2) frei bleibt. Durch die Drähte wird ein Strom von ca. 1 bis 2 Amp. geschickt, das Feld entspricht also demjenigen eines Drahtes, der von 20 bis 40 Amp. durchflossen wird.

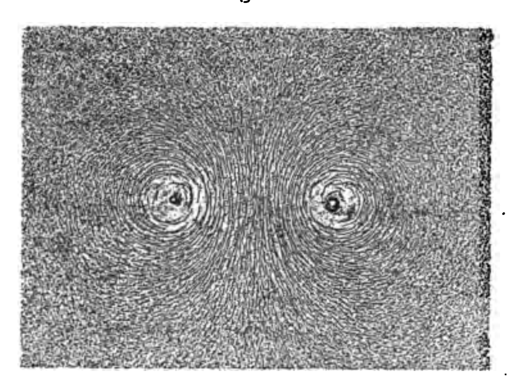
1) Ueber R_1 wird ein Cartonblatt geschoben, mit Eisenfeile bestreut, mit den Fingernägeln geklopft, dann erhält man die Kraftlinien (Fig. 296).

2) Die beiden Rahmen R_1 und R_2 werden neben einander gestellt, über beide ein Cartonblatt geschoben etc. und der Strom durch beide

in gleichem und entgegengesetztem Sinne geschickt. Die Kraftlinien haben im ersten Falle die Gestalt (Fig. 297), im zweiten Falle die der Fig. 298.

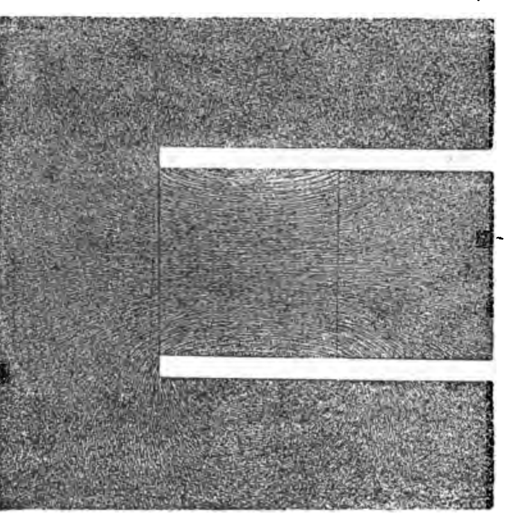
3) An einer flachen Spule, wie sie z. B. bei der Tangentenbussole zur Anwendung kommt, werden die Kraftlinien erzeugt, sie geben dieselbe Figur wie zwei parallele entgegengesetzte Ströme (Fig. 298). (Der Unterschied ist der, dass die Figur bei der Spule für jede senkrecht zu der Ebene derselben durch den Mittelpunkt gehende Ebene die gleiche ist, für parallele Drähte aber nicht.)


Fig. 298.



4) Die Kraftlinien werden für ein Solenoid, das locker gewickelt ist, erzeugt, man erhält nahezu Fig. 299, die weissen Stellen der Zeichnung entsprechen dem Solenoid. Im Inneren sind die Kraftlinien fast parallel und divergiren an den Enden, wie an den Polen eines Magneten.

Fig. 299.



5) Die Kraftlinien werden für ein längeres Solenoid mit mehr Windungen erzeugt, die Divergenz an den Enden und die Analogie mit den Kraftlinien eines Magneten tritt sehr deutlich hervor.

II. Wechselwirkung zwischen Strömen und Strömen: Elektrodynamik.

Uebung 1. Man verbindet die Klemmschrauben der Ampère'schen Stative, Fig. 300, unter Zwischenschaltung je eines Commutators mit den Polen je eines Chromsäure-Elementes, und zwar so, dass die Ströme in der in der Figur angedeuteten Richtung laufen. Man nähert

den Theil *gf* dem Theile *ad*, es zeigt sich eine Anziehung, man nähert den Theil *gf* dem Theile *cb*, es zeigt sich eine Abstossung. Es ergiebt sich: Gleich gerichtete Ströme ziehen sich an, entgegengesetzt gerichtete stossen sich ab (elektrodynamische Wirkungen).

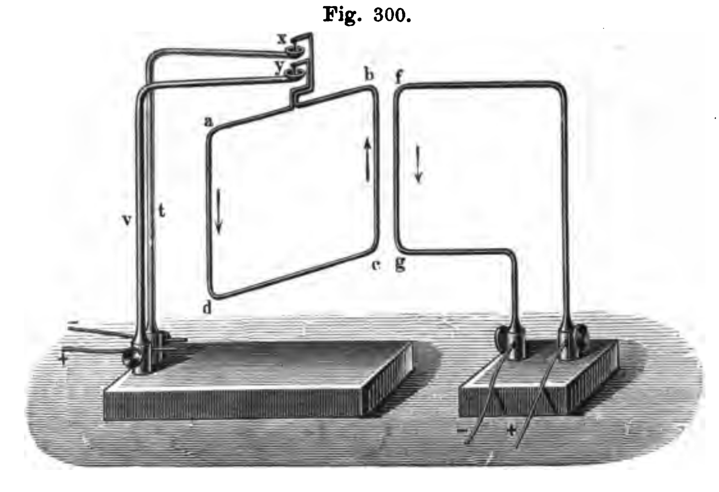
Man wechselt die Stromrichtung und controlirt das gefundene Resultat.

Man hält *fg* so unter *dc*, dass sie einen Winkel mit einander bilden, *abcd* dreht sich so, dass in *dc* und *gf* parallel gerichtete Ströme fliessen.

Bemerkung. Man kann diese Wirkungen auch aus den Eigenschaften der Kraftlinien ableiten (s. oben).

Uebung 2. Man verbindet die Enden *a* und *b* der einen Buff'schen Bandspirale S_1 (Fig. 301, a. f. S.) und die Enden *c* und *d* der anderen S_2

Fig. 300.



unter Einschaltung von Commutatoren mit den Polen je eines Elementes. Man beobachtet Anziehungen und Abstossungen. Verfolgt man die Stromrichtung, so ergiebt sich dasselbe Gesetz wie oben. (Bei den Spiralen üben hauptsächlich die einander zunächst liegenden Theile Wirkungen auf einander aus.)

Uebung. 3. Man hängt die Drahtspirale (Fig. 302, a. f. S.) auf das Stativ Fig. 300 und nähert ihrer Grundfläche diejenige einer ebensolchen Spirale; durch beide leitet man Ströme. Fliessen in den benachbarten, einander zugekehrten kreisförmigen Grundflächen die Ströme in gleichem Sinne, so ziehen sich die Spiralen an, sonst stossen sie sich ab.

Uebung 4. Man überlässt die aufgehängte stromdurchflossene Spirale eine Zeit lang sich selbst. Sie richtet sich mit ihrer Axe nordsüdlich, und zwar so, dass in dem nach Norden gerichteten Ende die

Ströme einem von aussen darauf blickenden Beobachter entgegengesetzt dem Sinne des Uhrzeigers, in dem nach Süden gerichteten Ende in dem Sinne des Uhrzeigers zu fliessen scheinen. Man spricht von einem Nord- und einem Südpol des Solenoides oder der Spirale.

Fig. 301.

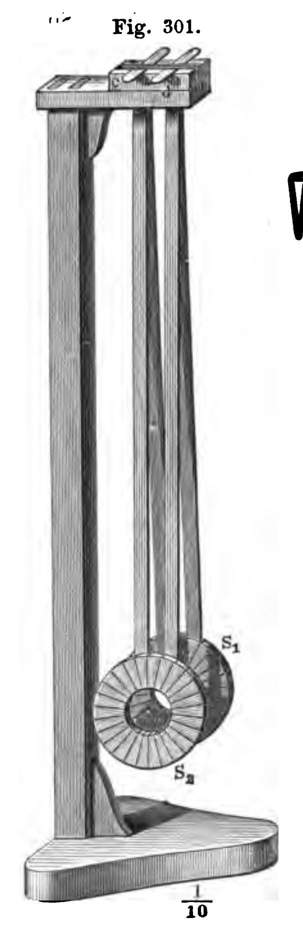


Fig. 302.

Auch die Wirkungen 2 und 3 lassen sich erklären, wenn man die Wirkungen von Strömen auf einander als bedingt ansieht durch die sie umgebenden Kraftlinien.

3. Wirkung von Strömen auf Magnete und von Magneten auf Ströme. Elektromagnetismus.

Uebung. 1. Man nähert den Polen eines auf einer Spitze schwebenden Magnetstabes den Draht *gf* des einen Gestelles, Fig. 300, und zwar in den verschiedensten Stellungen, und vergleicht die Bewegungen mit der Ampère'schen Regel und der entsprechenden rechten Handregel (vergl. S. 368).

Uebung 2. Man nähert den verschiedenen Theilen des beweglichen Drahtvierecks *abcd* von innen und aussen die beiden Pole eines Magneten und vergleicht die Bewegungen mit der linken Handregel auf S. 440.

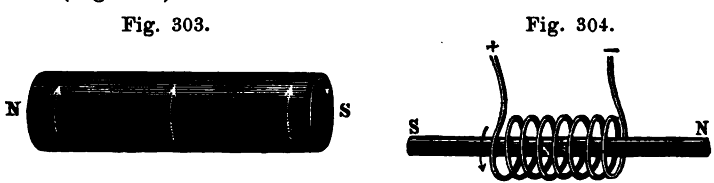
Uebung 3. Man schiebt über *cb* einen Hufeisenmagnet, so dass die von den Polen ausgehenden Kraftlinien *cb* schneiden. Die Pole unterstützen sich in der Wirkung, resp. die Zahl der Kraftlinien wird bei dieser Anordnung vergrössert. Kehrt man den Elektromagneten um 180° um, so kehrt sich auch die Bewegung um.

Uebung 4. 1) Man nähert die stromdurchflossene Spirale (Fig. 302) einer drehbaren Magnetnadel, der Nordpol wird vom Nordende abgestossen, der Südpol angezogen, umgekehrt ist es am Südende.

2) Man nähert dem Nordende eines am Stativ aufgehängten vom Strome durchflossenen Solenoides (Fig. 302) den Nordpol eines Magneten, es wird abgestossen, man nähert den Südpol, es wird angezogen.

Aus dem Obigen folgt: In vieler Hinsicht verhalten sich Solenoide wie Magnete und Magnete wie Solenoide. Das einen Magneten ersetzende Solenoid ist so beschaffen, dass einem von aussen blickenden Beobachter an dem Nordpole die Ströme entgegengesetzt dem Sinne des Uhrzeigers, am Südpole im Sinne des Uhrzeigers zu fliessen scheinen (Fig. 303).

Fig. 303. Fig. 304.



Die Wechselwirkungen von Strömen und Magneten ergeben sich auch aus der Betrachtung der Kraftlinienbilder in beiden Fällen.

4. Verhalten von stark magnetisirbaren Körpern im magnetischen Felde.

Eine Reihe von Körpern, wie Eisen, Stahl, Nickel, Kobalt, Magneteisenstein u. a., werden, wenn sie einem Magneten genähert, oder allgemein, wenn sie in ein magnetisches Feld gebracht werden, selbst magnetisch, d. h. sie ziehen Eisenstücke an.

Uebung 1. Magnetisirung durch einen Magneten. Auf eine an einem Stativ befestigte Glasplatte *G* stellt man einen kleinen Eisencylinder *C*. Hält man unter *C* etwa einen Nagel *N* und nähert *C* einen Magneten *M*, so wird *N* angezogen und fällt nicht ab, entfernt man *M*, so fällt der Nagel ab. Unter dem Einflusse des Magneten ist also *C* temporär magnetisch geworden, wird aber unmagnetisch bei Entfernung der magnetisirenden Ursache. Stahl, der magnetisch ist, behält dagegen seine magnetische Eigenschaft, er liefert permanente Magnete.

Uebung 2. Magnetisirung im magnetischen Felde eines Solenoides.

a. 1) Man legt in eine Drahtspirale, Fig. 304, eine Glasröhre (in der Figur ist die Glasröhre fortgelassen), und in diese einen weichen Eisendraht. Eisenstückchen, etwa kleine Nägel, werden von demselben nicht angezogen.

2) Man leitet einen Strom durch die Spirale; der Eisendraht zieht die Nägel an und trägt sie, er ist magnetisch geworden.

3) Man unterbricht den Strom, die Nägel fallen ab, der Draht wird wieder unmagnetisch.

Im ersten Falle ist der Eisendraht ein Elektromagnet geworden. Ein Elektromagnet ist ein Stück weiches Eisen, das durch einen

Strom, den man um dasselbe leitet, in einen Magneten verwandelt ist. Beim Aufhören des Stromes verschwindet der Magnetismus fast vollständig.

b. 1) Man legt in die Glasröhre in der Spirale einen Stahldraht (eine Stricknadel), der Stahl wird beim Herumleiten des Stromes magnetisch, wenn auch schwächer als das Eisen, es haften an ihm die Nägel.

2) Man öffnet den Strom, die Nägel fallen nicht ab, der Stahl bleibt magnetisch.

c. 1) Man nähert der vom Strome durchflossenen Spirale, die mit ihrer Axe in der OW-Richtung aufgestellt ist, eine auf einer Spitze schwebende Magnetnadel, und bestimmt das Ende der Spirale, von dem der Nordpol angezogen, der Südpol abgestossen wird.

2) Man legt in die Spirale das weiche Eisen, der Nordpol wird viel stärker angezogen, der Südpol viel stärker abgestossen.

Daraus folgt: Der durch den Strom in einem weichen Eisenkern erzeugte Magnetpol ist stets so beschaffen, dass wir annehmen können, es fliessen um ihn Ströme in demselben Sinne, wie in der magnetisirenden Spirale.

Allgemeine Bemerkung: Ampère hat die Anschauung aufgestellt, dass die magnetisirbaren Körper aus kleinen Molecularmagneten bestehen, gebildet aus Molecülen, die von Kreisströmen umflossen und durch die Molecularkräfte in ihren gegenseitigen Lagen erhalten werden. Beim Magnetisiren werden alle diese Molecularmagnete mit ihren Kreisströmen um ihre Schwerpunkte gedreht und mehr oder weniger vollkommen gerichtet, und zwar, wie die oben ausgeführten Versuche zeigen, so, dass die Molecularströme dem magnetisirenden Strome mehr oder weniger parallel liegen und mit ihm im gleichen Sinne fliessen. Beim Aufheben der magnetisirenden Kraft kehren beim Eisen die Molecularmagnete fast völlig durch die Wirkung der Molecularkräfte in ihre ursprüngliche Lage zurück, beim Stahl bleiben sie in Folge von Reibungskräften, der Coërcitivkraft, mehr oder weniger in ihrer neuen Lage, werden aber auch in Folge derselben viel schwieriger in eine bestimmte Lage gebracht, als beim Eisen.

XI. Induction.

Gebraucht wird: Empfindliches Galvanometer mit Fernrohr und Scala, event. zur Projection eingerichtet; zwei starke Stabmagnete; drei Rahmen mit Drähten, um eine in der Inclinationsrichtung liegende Axe drehbar; zwei Solenoide von verschiedenem Durchmesser; kleiner Elektromagnet; Eisenkerne; Disjunctor; der Wagner'sche Hammer; Inductions- (Schlitten-) Apparat mit einem Messing-, einem massiven Eisen- und einem Eisendrahtbündelkern und Handhaben; kleine Geissler'sche Röhre.

Einleitung.

Aendert man die relative Lage zwischen einem Leiter A und einem Strome B, nähert oder entfernt man sie von einander, so entsteht in dem Leiter ein „inducirter" Strom; ändert man die Lage eines Leiters gegenüber einem Magneten, so entsteht ebenfalls ein Strom. Aendert man die Intensität des Stromes, oder die Stärke des Magneten, so entsteht ebenfalls ein Strom. Nur in ganz vereinzelten Ausnahmefällen tritt dies nicht ein.

Man nennt, wie erwähnt, den in dem Leiter A erzeugten Strom den inducirten Strom, den Strom in dem Leiter B den inducirenden. Man nennt auch den Leiter B den primären, den Leiter A den secundären Leiter.

Die Induction bei Wechselwirkung von Strömen und Leitern heisst Elektroinduction oder Voltainduction; sie entspricht den elektrodynamischen Wirkungen. Die Induction bei Wechselwirkung von Magneten und Leitern heisst Magnetoinduction, sie entspricht den elektromagnetischen Wirkungen.

Die Bedingungen, unter welchen ein inducirter Strom entsteht und unter welchen nicht, lassen sich durch die Art der Veränderung gewisser mathematisch-physikalischer Grössen definiren, weit anschaulicher aber bei Zugrundelegung der Kraftlinien. Die Versuche ergeben, dass die Lagenänderung des Leiters gegen die Kraftlinien die inducirten Ströme nach Richtung und Grösse bestimmt; da nun in der Umgebung von Strömen und Magneten Kraftlinienfelder vorhanden sind, so kann man die bei beiden auftretenden Inductionserscheinungen einheitlich zusammenfassen.

Schneidet ein Leiter bei seiner Bewegung Kraftlinien oder wird er bei der Bewegung von Magneten oder von Strömen von den diesen zugehörigen Kraftlinien geschnitten, so werden in ihm Ströme inducirt.

Ebenso treten inducirte Ströme auf, wenn der Leiter von den bei Verstärkung und Schwächung von Strömen und Magneten entstehenden und vergehenden Kraftlinien geschnitten wird. In einem Leiter, der nicht von Kraftlinien geschnitten wird, werden keine Ströme inducirt.

Inducirt wird zunächst nicht ein Strom von der beobachteten Intensität i, sondern eine elektromotorische Kraft E, und diese ruft dann in dem Leiter vom Widerstand w einen Strom hervor:

$$i = \frac{E}{w}.$$

Die Richtung des inducirten Stromes ist durch eine der Ampère'schen Regel analoge gegeben.

Ein Beobachter liegt in der Richtung der Kraftlinien, und in dem Felde wird ein Leiter verschoben. Blickt dann der Beobachter in der Richtung dieser Verschiebung, so geht der inducirte Strom von seiner Linken zu seiner Rechten.

Statt dieser Regel hat Fleming die sogen. rechte Handregel gegeben:

Man stellt Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger senkrecht zu einander. Den Zeigefinger legt man in die Richtung der Kraftlinien, den Daumen in die Richtung der Verschiebung, den Mittelfinger in die Richtung des Leiters, dann giebt die Richtung des letzteren auch die Stromrichtung an.

Die inducirte elektromotorische Kraft ist proportional der in der Zeiteinheit geschnittenen Anzahl Kraftlinien.

Bewegt sich der Leiter von einer Anfangslage zu einer Endlage einmal schnell, das andere Mal langsam, so ist im ersten Falle die elektromotorische Kraft grösser als im zweiten, da sie aber längere Zeit wirkt, ist die inducirte Elektricitätsmenge die gleiche.

Keine Induction findet statt, wenn der Leiter in der Richtung der Kraftlinien liegt, oder wenn die Bewegung in der Richtung der Kraftlinien geschieht.

In vielen Fällen gestalten sich die Inductionsversuche derart, dass ein fast geschlossener Leiter (ein Drahtkreis A) in einem Magnetfelde (von einem Magneten, einem Strome herrührend) oder umgekehrt bewegt wird; die obigen Gesetze nehmen dann die Form an:

Die inducirte elektromotorische Kraft ist gleich der Aenderung der Zahl der den Stromkreis schneidenden Kraftlinien in der Zeiteinheit, die gesammte bei der Bewegung bewegte Elektricitätsmenge ist gleich der Gesammtänderung der den Stromkreis durchschneidenden Kraftlinien, dividirt durch den Widerstand des Stromkreises.

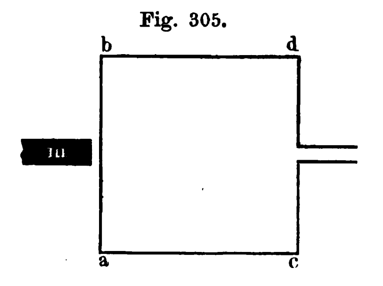
Nimmt bei der Bewegung die Zahl der vom Stromkreise umschlossenen Kraftlinien ab, so wird ein Strom im Uhrzeigersinne (in der Richtung der Kraftlinien gesehen, der directe Strom) inducirt, nimmt die Zahl der umschlossenen Kraftlinien zu, so wird ein Strom im entgegengesetzten Sinne (der inverse Strom) inducirt.

1. Induction in geraden bewegten Leitern.

Apparat. Zu den Grundversuchen dienen als inducirte Leiter Drahtspulen von etwa 10 Windungen von quadratischem Querschnitt *abcd*, Fig. 305. Um die eine Seite *cd* ist das Quadrat drehbar, der gegenüberliegenden Seite *ab* (ca. 30 cm lang) wird die inducirende Ursache, ein Magnetpol *m*, das Ende eines Solenoids mit oder ohne Eisenkern, ein stromdurchflossenes, *ab* paralleles Leitersystem genähert.

Die etwa in *ac* und *bd* bei der Bewegung des ganzen Quadrates inducirten Ströme haben entgegengesetzte Richtung und heben sich auf. In *dc* wird, da es seine Lage nicht ändert, kein Strom inducirt. Wir beobachten also nur die Wirkung auf *ab*. Die Drehungsaxe *dc* wird in die Richtung der Inclination gebracht. Die inducirenden Wirkungen des Erdmagnetismus fallen dann vollständig fort.

Fig. 305.



Benutzt werden drei unmittelbar neben einander stehende Spulen. Die Spulen sind hinter einander geschaltet und können einzeln, zu zweien oder zu dreien an der inducirenden Ursache vorbei geführt werden. Zur Beobachtung dient ein empfindliches schwach gedämpftes Galvanometer, womöglich mit objectiver Ablesung oder mit Spiegelablesung. In den inducirten Schliessungskreis ist stets ein Commutator und ein veränderlicher Widerstand eingeschaltet.

Uebung 1. Die inducirte elektromotorische Kraft ist proportional der Stärke des Magnetfeldes, also der Zahl der geschnittenen Kraftlinien.

1) Man bringt an die Stelle *m* (Fig. 305) einen Magneten I und bewegt einen Rahmen vorbei (Ausschlag α_1).

2) Man bringt an Stelle von I einen möglichst gleichen Magneten II und bewegt den Rahmen vorbei (Ausschlag α_2).

3) Man legt die Magnete I und II neben einander und findet einen Ausschlag α_3 (nahezu $\alpha_3 = \alpha_1 + \alpha_2$). (Dieselben Versuche werden mit den entgegengesetzten Polen der Magnete I und II angestellt, die Ausschläge sind gleich aber entgegengesetzt.)

Uebung 2. Die inducirte elektromotorische Kraft ist proportional der Zahl der geschnittenen Drähte.

1) Man bringt an die Stelle *m* einen (resp. zwei Magnete) und bewegt einen oder zwei Rahmen vorbei, die Ausschläge sind im zweiten Falle doppelt so gross als im ersten.

Uebung 3. Inducirte elektromotorische Kraft im Felde eines geraden Leiters.

An Stelle des Magneten *m* wird ein dem Rahmen I *abcd* gleicher

Rahmen II aufgestellt und durch ihn ein Strom geleitet. Ein Rheostat lässt seine Stärke ändern, ein Ampèremeter sie messen.

1) Bei einer gegebenen Stromstärke in II nähert und entfernt man I und II und bestimmt die Ausschläge.

2) Man führt denselben Versuch bei verschiedenen Stromstärken aus.

3) Man öffnet und schliesst den Strom in II, während er neben I steht, und bestimmt die Ausschläge. Der Versuch wird bei verschiedenen Stromstärken ausgeführt.

Die Versuche ergeben: die inducirten Ströme sind proportional der Stromstärke im primären Leiter, sie sind gleich und entgegengesetzt beim Oeffnen und Schliessen, Entfernen und Annähern.

Uebung 4. Inducirte Ströme beim Bewegen von Leitern im Felde von Solenoiden.

An die Stelle *m* wird ein Solenoid gebracht, dasselbe ist mit einem Widerstande und einem Ampèremeter in den Stromkreis einer Accumulatorenbatterie geschaltet.

a) Solenoid von kleinem Durchmesser. Man bewegt die Rahmen bei verschiedenen Stromstärken an den Polen des Solenoides vorbei.

Die Ausschläge sind proportional den Stromstärken.

b) Solenoid von grösserem Durchmesser aber gleicher Windungszahl auf der Längeneinheit.

Die Ausschläge werden wesentlich grösser.

Die Feldstärke, d. h. die Kraftlinienzahl pro Flächeneinheit, am Ende eines Solenoides ist

$$H = 2\pi N \frac{i}{10},$$ [1]

wo N die Zahl der Windungen auf der Längeneinheit, i die Stromstärke in Ampère gemessen ist. Ni ist die Zahl der Ampèrewindungen auf der Längeneinheit.

Durch den ganzen Querschnitt Q eines Solenoides gehen $H . Q$ Kraftlinien. Ist der Querschnitt eines Solenoides grösser, so gehen unter sonst gleichen Umständen mehr Kraftlinien hindurch und die inducirten elektromotorischen Kräfte wachsen.

Uebung 5. Inducirte Ströme beim Bewegen von Leitern im Felde von Elektromagneten.

In ein Solenoid wird zunächst ein nicht zu dicker Eisenstab (so dass etwa acht derselben in den inneren Raum gehen) gelegt, und unter Einschaltung eines Rheostaten und eines Ampèremeters durch das Solenoid verschieden starke Ströme geschickt und die inducirten Ströme gemessen.

Bei gleichen Zunahmen der Intensität, also der die Magnetisirung erzeugenden Feldstärke, wächst die inducirte elektromotorische Kraft,

---

[1]) Im Inneren ist $H_J = 4\pi N i/10$.

also die vom magnetisirten Eisen herrührende Kraftlinienzahl, die Feldstärke, um gleich viel, vorausgesetzt, dass man innerhalb gewisser mittlerer Stromstärken bleibt.

Bemerkung. Die Feldstärke des Magneten ist aber nicht der Intensität des Stromes, also der Stärke des erregenden Feldes selbst proportional, sie wächst erst langsamer, dann schneller und dann wieder langsamer.

Uebung 6. In das Solenoid werden 1, 2, 3, 4 etc. Eisenstäbe gebracht. Die inducirten Ströme, also die Feldstärke, wächst mit der Zahl derselben.

2. Induction in geschlossenen Leitern.

a) Im Felde von Magneten.

Uebung 1. Ueber dem Pol eines Magnetstabes wird eine Spirale, die mit einem Galvanometer verbunden ist, aufgestellt.

1) Man stellt erst ihre Axe parallel zu der Axe des Magnetstabes, und dreht sie

2) dann so, dass die beiden Axen senkrecht zu einander stehen. Bei 1) geht eine Maximalzahl von Kraftlinien durch die Spirale, bei 2) fast keine, die Zahl der Kraftlinien nimmt ab, man erhält einen inducirten Strom in einem Sinne.

3) Man dreht die Spirale aus der Lage 2) in die Lage 1), die Zahl der durch sie gehenden Kraftlinien wächst, man erhält einen Strom im entgegengesetzten Sinne.

4) Man stellt die Spirale fest und bewegt den Magneten von einer Stelle, wo seine Axe mit derjenigen der Spirale zusammenfällt, zu der, wo sie auf ihr senkrecht steht und erhält einen Strom wie bei 1) und 2).

b) Unter dem Einflusse des Erdmagnetismus.

Man dreht ähnliche Spiralen oder das oben beschriebene rechteckige System im Felde des Erdmagnetismus und bestimmt die Grösse der inducirten Ströme bei verschiedenen Lagen und Drehungen der Spirale.

3. Induction in Spiralen. Anwendung beim Inductorium.

I. Voltainduction.

Wir prüfen die Inductionsgesetze noch einmal mit den Buff'schen Spiralen (Fig. 301), um sie in der Gestalt zu erhalten, wie sie bei dem Inductionsapparate etc. Anwendung finden. Die Spirale S_1 wird mit einem Commutator, einem Unterbrecher und einem Chromsäureelement in einen Stromkreis geschaltet; die Spirale S_2 wird mit einem Spiegelgalvanometer in einen Kreis geschaltet [1]). Die Spirale S_1

---

[1]) Zweckmässig ist es, ein zur objectiven Darstellung eingerichtetes Spiegelgalvanometer zu verwenden.

heisst die **primäre** oder **inducirende** Spirale, die Spirale S_2 die **secundäre** oder **inducirte** Spirale, die Ströme in S_1 heissen **inducirende**, in S_2 **inducirte Ströme** oder **Inductionsströme**.

Uebung. 1) Man bestimmt den Sinn des Ausschlages des Galvanometers, wenn durch das Galvanometer ein Strom in bestimmtem Sinne fliesst.

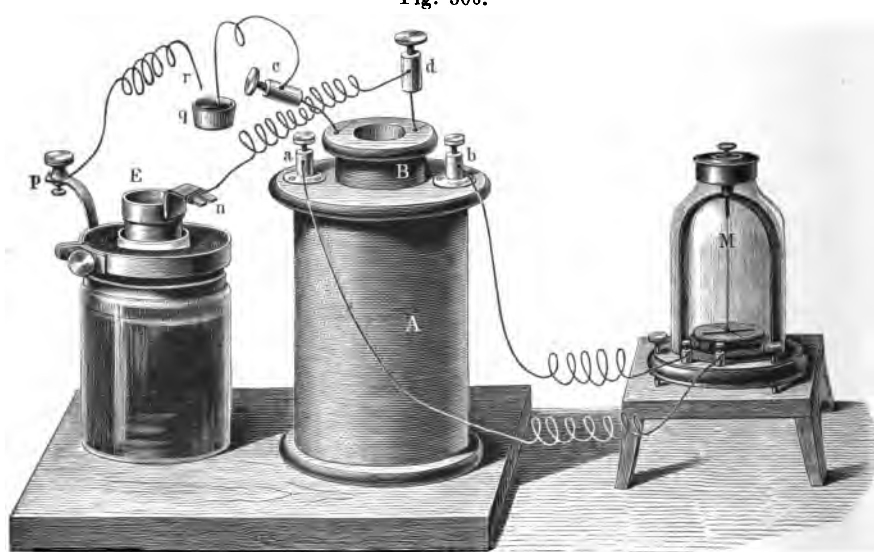
2) Man schliesst den durch S_1 fliessenden Strom dauernd.

3) Man nähert S_1 dem Leiter S_2. Das Galvanometer schlägt aus, in S_2 ist ein Strom inducirt, welcher dem inducirenden Strome entgegengesetzt gerichtet ist.

4) Man entfernt S_1 von S_2. Das Galvanometer schlägt aus, der inducirte Strom ist dem inducirenden gleich gerichtet.

5) Man schliesst den inducirenden Strom in S_1, es wird ein dem inducirenden Strome entgegengesetzter inducirt.

Fig. 306.



6) Man öffnet den inducirenden Strom in S_1, es wird ein dem inducirenden gleich gerichteter inducirt.

Dieselben Versuche werden mit den Spiralen A und B (Fig. 306) angestellt. B ist die inducirende, primäre Spirale, sie besteht aus kurzem, dickem Draht; A ist die inducirte, secundäre Spirale, sie besteht aus langem, dünnem Draht. Man schiebt B in A hinein oder zieht B aus A heraus, man schliesst oder öffnet den Strom in B durch Eintauchen des Drahtes r in das Quecksilbernäpfchen q oder Herausziehen aus demselben. Die Ausschläge werden viel grösser als vorher bei 5) und 6), da die Zahl der auf einander wirkenden Drahtwindungen viel grösser ist. Statt des

in der Figur gezeichneten Nadelgalvanometers M wird besser ein Spiegelgalvanometer benutzt. Der Sinn der Ausschläge ist der von 3) bis 6) angegebene.

Bemerkung. Das Schliessen und Oeffnen des Stromes, d. h. das Entstehen und Vergehen des Stromes in einem an einem Orte ruhenden Leiter, entspricht vollkommen der Annäherung des Stromes aus sehr grosser (unendlicher) Entfernung bis zu diesem Orte oder der Entfernung bis zu unendlich grosser Entfernung von diesem Orte.

Der inducirte Strom hat nur eine sehr kurze Dauer; nachdem der Strom geschlossen und constant geworden oder geöffnet und verschwunden ist, kehrt daher die Nadel schnell in ihre Nulllage zurück.

2. Magnetoinduction.

Inductionsströme entstehen, wie schon ausgeführt, dadurch, dass Magnete und Ströme ihre gegenseitige Lage ändern, oder dadurch, dass in der Nähe von Leitern Magnete ihre Stärke verändern.

1) Man nähert einen Magneten mit dem Nordpol der Spirale S_2 (Fig. 302), es wird ein Strom inducirt, der den Molecularströmen im Magneten entgegengesetzt gerichtet ist.

2) Man entfernt den Magneten von der Spirale S_2, es wird ein Strom inducirt, der den Molecularströmen im Magneten gleich gerichtet ist.

3) Man nimmt statt des Nordpols den Südpol: die Richtung der Ströme kehrt sich um.

4) Man steckt in die Spirale B (Fig. 306) einen weichen Eisenkern und nähert den Südpol eines Magnetstabes dem einen Ende des Eisenkernes; dadurch entsteht in demselben ein magnetischer Nordpol, wodurch ein Strom wie in 1) inducirt wird.

5) Man entfernt den Magneten, wobei der Magnetismus des Eisenkernes wieder verschwindet: es wird ein Strom von der entgegengesetzten Richtung inducirt. Dasselbe tritt ein, wenn man dem Eisenkern den Nordpol des Magneten nähert.

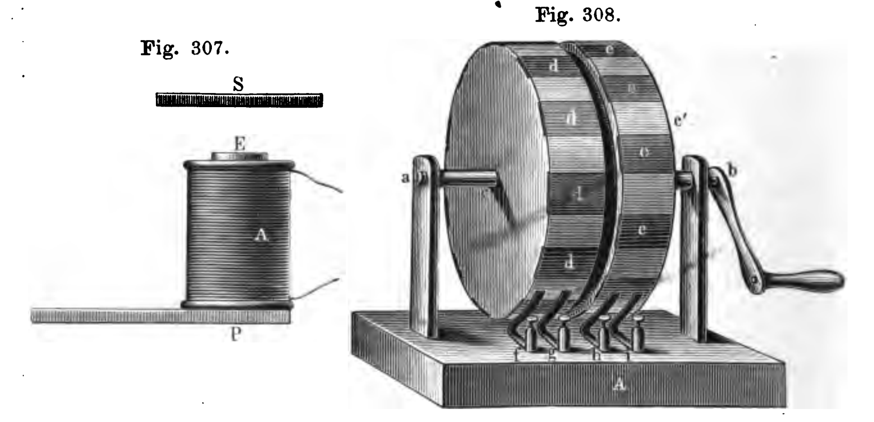
6) Die Spirale A (Fig. 307, a. f. S.) wird auf den einen Pol P eines kräftigen Stabmagneten gestellt, in die Spirale A wird auf den Pol P ein weicher Eisencylinder E gesetzt, der bis an das obere Ende von A reicht, derselbe wird dadurch magnetisch; man nähert ihm und entfernt von ihm ein Stück weichen Eisens S, dann treten in A Ströme auf, die in den beiden Fällen in entgegengesetztem Sinne fliessen. Durch das Annähern und Entfernen von S wird der Magnetismus des magnetischen Eisencylinders verstärkt und geschwächt. Hierdurch werden in der umgebenden Spirale Ströme von gleicher Richtung hervorgerufen, wie beim Entstehen und Verschwinden von Magnetismus. Diese Erscheinung findet beim Telephon Verwendung.

7) Unterbricht und schliesst man schnell hinter einander den pri-

mären Stromkreis mittelst des Disjunctors (Fig. 308), so entstehen im secundären Stromkreise abwechselnd entgegengesetzt gerichtete Ströme: ein eingeschaltetes Galvanometer zeigt keinen Ausschlag. Die beim Oeffnen und Schliessen im einen und anderen Sinne bewegten Elektricitätsmengen sind einander gleich.

Allgemeines. Die Richtung der inducirten Ströme ist eine solche, dass sie, auf die erzeugenden Ströme oder Magnete wirkend, die den letzteren ertheilte Bewegung in die entgegengesetzte verwandeln

Fig. 307. Fig. 308.

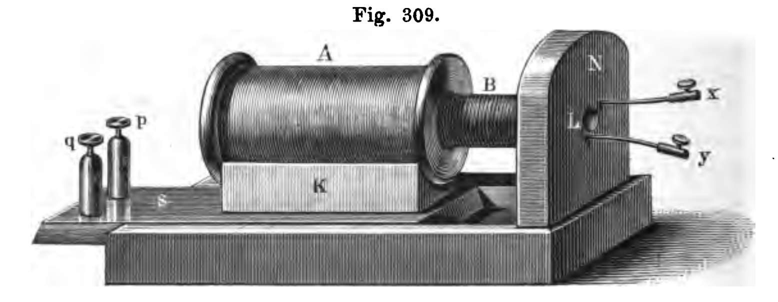


würden, z. B. beim Annähern werden entgegengesetzt gerichtete Ströme inducirt, die sich abstossen, beim Entfernen gleich gerichtete, die sich anziehen (Gesetz von Lenz).

3. Inductionsapparat, Schlittenapparat.

Apparat. Der Inductionsapparat (Fig. 309) besteht aus einer primären Spirale *B* aus dickem und einer secundären Spirale *A* mit vielen

Fig. 309.



Drahtwindungen aus dünnem Draht. Ueber die primäre Spirale *B*, deren Enden mit den Klemmen *x* und *y* verbunden sind, lässt sich die secundäre Spirale *A* schieben; ihre Enden sind mit den Klemmen *q* und *p* verbunden. Die primäre Spirale *B* ist hohl.

Schliesst oder öffnet man den inducirenden Strom eine Anzahl von

Malen hinter einander, so erhält man entsprechend stärkere Wirkungen. Dazu benutzt man a) den Disjunctor, b) den Wagner'schen oder Neef'schen Hammer.

a) Der Disjunctor besteht aus einer isolirenden Axe *ab* (Fig. 308), auf die zwei Räder *c* und *c'* aufgesetzt sind, deren Ränder abwechselnd mit nicht leitenden und leitenden Segmenten *d* und *e* ausgelegt sind und die sich gegen einander drehen lassen. Gegen die Räder schleifen mit den gleichnamigen Klemmschrauben *f*, *g* und *h*, *i* verbundene Federn. Die Räder *c* und *c'* werden durch eine Kurbel in Rotation versetzt. Man schaltet durch die Klemmschrauben *f* und *g* das Rad *c* in einen Schliessungskreis ein, welcher eine Säule und die inducirende Spirale enthält, während das Rad *c'* durch die Klemmschrauben *h* und *i* mit der Inductionsspirale verbunden ist.

Hat man die Räder *c* und *c'* α) so auf die Axe aufgesetzt, dass bei ihrer Drehung die Federn *h* und *i* eher auf die Metalloberflächen des Rades *c'* treten, als die Federn *f* und *g* auf die Metalloberflächen des Rades *c*, daher erstere auch früher von jenen Oberflächen abgleiten als letztere, so ist der Kreis des inducirten Stromes nur bei der Schliessung des primären Stromes geschlossen, bei der Oeffnung desselben geöffnet; durch den Kreis des inducirten Stromes kann nur der Schliessungsstrom hindurchgehen. β) Stellt man die Räder so, dass die Federn *h* und *i* später auf die Metallflächen von *c'* auftreffen und später von ihnen abgleiten, als die Federn *f* und *g* auf die Metallflächen von *c*, so kann durch den Schliessungskreis der Inductionsspirale nur der Oeffnungsstrom fliessen. — Wählt man die Metallflächen des Rades *c'* etwas breiter als die des Rades *c*, so kann man γ) beide Räder so stellen, dass die Mitten ihrer Metallflächen einander entsprechen. Dann wird bei der Drehung der Räder der inducirte Kreis vor dem inducirenden geschlossen und nach dem Oeffnen desselben geöffnet, und durch den ersteren gehen sowohl die Schliessungs- wie die Oeffnungsströme hindurch.

b) Der Wagner'sche oder Neef'sche Hammer (Fig. 300, a. f. S.) ist eine automatische Vorrichtung zum Oeffnen oder Schliessen der Ströme. Der inducirende Strom durchfliesst die Leitung *dopcbae* und geht dann um den Elektromagneten *M* nach der Klemmschraube *f*. *n* ist ein Eisenstück, *c* eine kleine Platinspitze, die auf einem Platinblech ruht. Ist der Strom geschlossen, so wird *M* magnetisch und zieht *n* an; dadurch wird bei *c* der Strom unterbrochen. Daher wird *M* wieder unmagnetisch, das Eisenstück *n* federt zurück, dann entsteht aber von Neuem Contact zwischen *p* und *c*, der Strom wird geschlossen, *M* wird wieder magnetisch u. s. f. Man hat abwechselnde Oeffnungen und Schliessungen des Stromes. Bei den gewöhnlich benutzten Inductionsapparaten ist in *B* (Fig. 309) ein Eisendrahtbündel eingelegt, das als Elektromagnet eines Neef'schen Hammers wirkt, der dem Ende dieses

Bündels gegenüber aufgestellt ist. Die Ebene der Feder *oo* ist dann vertical, die Spitze *qc* steht horizontal.

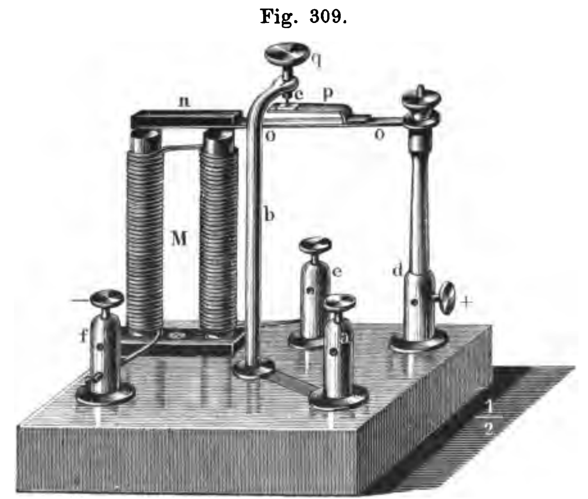
Uebung. 1) Man stellt die Räder des Disjunctors, wie unter α) angegeben ist, schliesst den secundären Stromkreis durch ein Galvanometer und dreht erst langsam, dann schneller. Der Ausschlag wächst, der inducirte Schliessungsstrom ist dem inducirenden entgegengesetzt.

2) Man stellt die Räder, wie bei β) angegeben ist, der inducirte Oeffnungsstrom ist dem inducirenden gleich gerichtet.

3) Man stellt die Räder, wie bei γ) angegeben ist. Man erhält keine Ablenkung, weil die in dem Oeffnungsstrome bewegte Elektricitätsmenge gleich der in dem Schliessungsstrome bewegten ist.

4) Man schiebt *A* bei der Stellung der Räder α und β verschieden weit über *B*, je weiter die Spiralen in einander stecken, um so stärkere Ströme erhält man.

Fig. 309.



5) Man schiebt in *B* durch *L* einen Messingstab, die Intensität des inducirten Stromes in *A* ändert sich kaum.

6) Man schiebt in *B* einen Eisenstab, die Intensität des inducirten Stromes in *A* wächst bedeutend.

Bemerkung. Durch den primären Strom wird in *A* beim Schliessen ein ihm entgegengesetzter Strom inducirt, gleichzeitig wird der Eisenstab magnetisch, und dies entspricht dem Entstehen von gleich gerichteten Molecularströmen in der Eisenmasse, die einen dem ursprünglichen Strome entgegengesetzten in *A* hervorrufen. Beim Oeffnen des Stromes in *B* wird ein gleich gerichteter Strom in *A* inducirt, zugleich verschwindet der Magnetismus im Eisenkern, dadurch wird in *A* ein Strom von demselben Sinne inducirt, der den ersteren verstärkt.

7) Man schiebt in *B* ein Eisendrahtbündel von denselben Dimensionen wie den Eisenstab ein; der Ausschlag des Galvanometers ist nahezu derselbe wie vorher.

8) Man verbindet die Enden der secundären Spirale mit den Elektroden einer kleinen Geissler'schen Entladungsröhre. Sie leuchtet

nur auf, wenn das Eisendrahtbündel eingeschoben ist. Nur in diesem Falle steigt an den Enden der secundären Spirale die Spannung hinlänglich hoch, um das Gas zu durchbrechen.

9) Man verbindet die Enden der secundären Spirale mit Handgriffen, die man in die Hand nimmt; man erhält Schläge, ein Zeichen, dass die inducirten Ströme eine kräftige physiologische Wirkung ausüben.

10) Man nimmt bei gleich schneller Drehung der Räder bei der Stellung α) und β) die Griffe in die Hand, bei β) erhält man stärkere Schläge als bei α). Es rührt dies daher, dass der Oeffnungsstrom viel schneller verläuft als der Schliessungsstrom, die physiologischen Wirkungen hängen aber von der Schnelligkeit der Stromänderungen ab.

11) Man schiebt erst den Eisenstab, dann das Eisendrahtbündel in die Spirale B ein; die physiologische Wirkung ist in letzterem Falle viel stärker als in ersterem. In beiden Fällen wird fast dieselbe Elektricitätsmenge inducirt, bei Anwendung des Drahtbündels aber in viel kürzerer Zeit, die physiologische Wirkung ist daher eine viel stärkere[1].

Bemerkung. In dem massiven Eisenkern und dem Eisendrahtbündel wird, wie in jedem Metallstück, beim Schliessen des magnetisirenden Stromes ein dem inducirenden Strom entgegengesetzter Strom inducirt, der die magnetisirende Wirkung des ersteren verlangsamt und damit auch die Erreichung des Endzustandes verzögert. Je stärker der inducirte Strom, um so später wird der Endzustand erreicht, auf einen um so grösseren Zeitraum vertheilt sich die Bewegung der gesammten Elektricitätsmenge. In dem massiven Eisenkern ist der inducirte Strom viel stärker als in dem Drahtbündel, weil in diesem der Widerstand viel grösser ist, daher wird in dem Drahtbündel der Endzustand viel schneller erreicht, als bei dem massiven Eisenkern. Von der Schnelligkeit des Verlaufes der Ströme hängt aber die physiologische Wirkung in viel höherem Grade ab, als von der Menge der bewegten Elektricität; wie u. A. auch die so heftigen physiologischen Erscheinungen bei den sehr schnellen Entladungen der relativ kleinen Elektricitätsmengen bei Leydener Flaschen zeigen.

[1] Dieser Versuch wird auch mit dem Wagner'schen Hammer angestellt.

XII. Bestimmung der Horizontalcomponente des Erdmagnetismus[1].

Gebraucht wird: Horizontal in einem Glaskasten an Coconfäden aufgehängter Magnetstab, Fig. 310; Fernrohr mit Scala, Stativ dazu; Gewichte zum Anhängen; Chronometer; getheilte Holzleiste mit Magnetnadel, Fig. 311.

Einleitung. Ein in seinem Schwerpunkte frei beweglich aufgehängter Magnet stellt sich mit seiner Axe in einer um einen kleinen Winkel α_1, die Declination, gegen den Meridian geneigten Ebene mit seinem Nordende schräg nach unten; den Winkel zwischen den Magneten und der Horizontalen nennt man die Inclination α_2. Einen Winkel α_1 bildet auch ein nur um eine verticale Axe drehbarer Magnet mit dem Meridian, einen Winkel α_2 ein nur um eine horizontale Axe drehbarer Magnet mit der Horizontalen.

Die Gesammtwirkung des Erdmagnetismus, die gesammte Intensität J desselben liegt in der Richtung, in der sich der obige Magnet einstellt.

Man zerlegt sie in eine Vertical- und Horizontalcomponente H. Meist wird die letztere und α_2 gemessen und daraus J berechnet ($H = J \cos \alpha_2$).

Wird ein in einer horizontalen Ebene drehbarer Magnetstab in einer senkrecht zur Richtung der Declination stehenden Richtung festgehalten, so wirkt auf ihn ein Drehungsmoment MH, das dem magnetischen Momente M des Magneten und der Horizontalcomponente H des Erdmagnetismus proportional ist.

In vielen Fällen ist es nöthig, sowohl das magnetische Moment M eines Magnestabes als auch die Kraft H der horizontalen Componente des Erdmagnetismus in absolutem Maasse zu messen.

Als Einheit des freien Magnetismus bezeichnet man diejenige Menge desselben, welche auf eine gleich grosse Menge des gleichen Magnetismus in der Einheit der Entfernung (1 cm) eine abstossende Kraft ausübt, die gleich ist der Wirkung der beschleunigenden Kraft Eins auf die Masse Eins (einer Dyne, vergl. S. 30 und 438).

Die Bestimmung der Grössen M und H geschieht nach Gauss, indem man die Werthe $M.H$ und M/H bestimmt.

---

[1]) Wir geben dem Zwecke des Buches entsprechend nur die einfachste Form der Bestimmungen.

A. Bestimmung von M . H.

Princip. Hängt man einen Magnetstab an einem dünnen Faden in der Mitte auf, so dass er horizontal schwebt, bringt ihn aus dem magnetischen Meridian heraus und lässt ihn schwingen, so gelten für die Schwingungsdauer analoge Gesetze, wie beim physischen Pendel.

Ist bei einem physischen Pendel T die Schwingungsdauer, K das Trägheitsmoment, S. 113, m die Masse des schwingenden Körpers, g die Beschleunigung durch die Schwerkraft, ϱ der Abstand seines Schwerpunktes vom Drehpunkte, so ergiebt sich

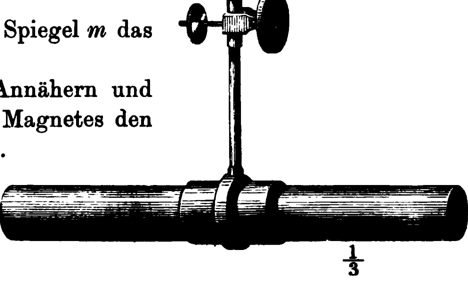
$$T = \pi \sqrt{\frac{K}{g m \varrho}}.$$

Bei dem schwingenden Magnet ist für $g m \varrho$ das Product der Horizontalcomponente H des Erdmagnetismus mit dem magnetischen Momente M des Stabes zu setzen, also ist die Schwingungsdauer t des Stabes

$$t = \pi \sqrt{\frac{K}{MH}} \quad \text{oder} \quad MH = \frac{\pi^2 K}{t^2}.$$

Apparat. In einem Glaskasten hängt ein Magnetstab mit Spiegel m (Fig. 310). Auf dem Kasten ist ein Aufsatz, ganz ähnlich dem beim Spiegelgalvanometer beschriebenen, aufgestellt, so dass man die Schwingungen des Magnetstabes mittelst des Spiegels untersuchen kann.

Fig. 310.



Uebung. a) Bestimmung der Schwingungsdauer.

1) Man stellt vor dem Spiegel m das Fernrohr auf (S. 26).

2) Man bringt durch Annähern und nachheriges Entfernen eines Magnetes den Magnetstab zum Schwingen.

3) Man bestimmt mit der Secundenuhr die Zeit z, die verstreicht, während der Nullstrich der Scala eine bestimmte Anzahl x von Malen durch das Fadenkreuz des Fernrohres hindurchgeht.

4) Die Schwingungsdauer ist

$$t = z/x.$$

b) Bestimmung des Trägheitsmomentes K.

1) Man hängt auf beiden Seiten je in gleichen, durch Querstriche bezeichneten Entfernungen r_1, r_2 u. s. f. von der Drehungsaxe gleiche

Gewichte q_1, q_2 u. s. f. an den Stab, welche oben Bügel mit Schneiden haben, die in die in den Stab eingefeilten Striche eingreifen.

2) Man versetzt den Stab in Schwingungen und bestimmt wie oben die Schwingungsdauern t_1, t_2 u. s. f.

Berechnung. Das Trägheitsmoment des Stabes ist um $2\,q_1\,r_1^2$, $2\,q_1\,r_2^2$ u. s. f. vermehrt und es ist

$$HMt_1^2 = (K + 2\,q_1\,r_1^2)\,\pi^2; \quad HMt_2^2 = (K + 2\,q_2 r_2^2)\,\pi^2.$$

Aus diesen Gleichungen, sowie der oben erhaltenen $HMt^2 = \pi^2 K$ ergiebt sich K und HM.

B. Bestimmung von M/H.

Princip und Apparat. Man legt eine getheilte Holzleiste mit einer Längsrinne in horizontaler Lage in einer gegen den magnetischen Meridian senkrechten Richtung auf eine feste Unterlage und stellt auf die

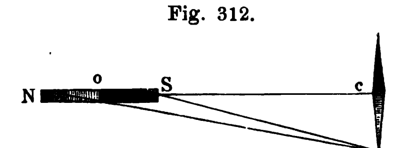
Fig. 311.



Mitte derselben eine Bussole mit Kreistheilung, deren Nadel ns sich in der magnetischen Nord-Südrichtung senkrecht zur Leiste einstellt. Zweckmässiger hängt man in der Bussole die Nadel an einem Coconfaden auf. In die Rinne legt man den zu den vorigen Versuchen benutzten Magnetstab NS.

Ist (Fig. 312) der Abstand des Mittelpunktes o des Stabes NS von der Mitte c der Nadel ns gleich r, ist die Nadel ns gegen die Entfernung oc sehr klein, so können wir die von den Polen N und S des Stabes auf die Pole der Nadel wirkenden Kräfte als in der Verbindungslinie oc thätig ansehen und annehmen, dass die Wirkungen des Magnetes von seinen Polen ausgehen. (Dies ist nicht ganz richtig, da die der Nadel näher liegenden freien Magnetismen der einen Seite des Stabes relativ stärker wirken als die entfernteren der anderen).

Fig. 312.



Sind ferner die in den Polen concentrirt gedachten freien Magnetismen des Stabes $\pm m$, die in denen der Nadel $\pm \mu$, ist der Polabstand des Stabes $2\,a$, so ist z. B. die Wirkung beider Pole des Stabes auf den einen Pol der Nadel gleich

$$m\mu/(r + a)^2 \quad \text{und} \quad - m\mu/(r - a)^2,$$

also ihre Summe, wenn $M = 2\,am$ das Moment des Stabes ist:

$$F = -\frac{4\,r\,a}{(r^2 - a^2)^2}\,m\mu = -\frac{2\,r}{(r^2 - a^2)^2}\,M\mu.$$

Ist der halbe Polabstand des Stabes a gegen den Abstand r zu vernachlässigen, so wird

$$F = -2 M\mu/r^3.$$

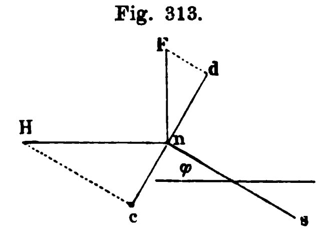
Die Kraft F ändert sich umgekehrt proportional der dritten Potenz des Abstandes r in Folge der Wirkung der beiden Pole. Das auf beide Pole der Nadel ausgeübte Drehungsmoment wird gleich

$$\frac{2 M\mu \,.\, 2\alpha}{r^3} = \frac{2 M M_1}{r^3},$$

wenn M_1 das magnetische Moment der Nadel von der Länge 2α ist.

Durch die Kraft F wird die Nadel aus ihrer Lage im erdmagnetischen Meridian um einen Winkel φ abgelenkt. Auf den einen Pol n der Nadel wirkt dann die Horizontalcomponente des Erdmagnetismus in der Richtung des Meridians mit der Kraft μH, und die Kraft F in der Richtung nF, senkrecht zu ersterer mit der Stärke $M\mu/r^3$. Soll die Nadel unter Einwirkung beider Kräfte im Gleichgewichte sein, so müssen die gegen die Nadel senkrecht gerichteten Componenten beider Kräfte $nc = nd$ sein, d. h.

Fig. 313.



$$\mu H \sin\varphi = 2\frac{M\mu}{r^3}\cos\varphi \quad \text{oder} \quad \frac{1}{2} r^3 \operatorname{tg}\varphi = M/H.$$

Uebung. 1) Man legt den Magnetstab in die Rinne in verschiedenen Abständen von der Nadel, misst diese und die Ablenkungen.

2) Man legt den Stab abwechselnd mit dem Nord- und Südpol und von entgegengesetzten Seiten der Nadel gegenüber und nimmt das Mittel der Ablenkungen φ nach beiden Seiten; dadurch kann man gewisse Fehler der Einstellungen eliminiren.

Berechnung. Aus den Werthen für MH und M/H folgt

$$H = \frac{\pi}{t}\sqrt{\frac{2K}{r^3 \operatorname{tg}\varphi}} \quad \text{und} \quad M = \frac{\pi}{t}\sqrt{\frac{K r^3 \operatorname{tg}\varphi}{2}}.$$

Praktisches.

In den folgenden praktischen Winken haben wir das Wenige aufgenommen, das unmittelbar bei den Uebungen in Betracht kommt.

Löthen:

Zur metallischen Verbindung zweier Metallstücke dient das Löthen. Ist die Temperatur, der die Löthstelle ausgesetzt werden soll, nicht hoch (unter 150 bis 170°), so verwendet man leicht schmelzbares Weichloth (weich löthen), sonst schwer schmelzbares Hartloth (hart löthen). Wir besprechen nur ersteres. Das Weich- oder Schnellloth ist eine Legirung von Zinn und Blei (Schmelzpunkt etwa 180°).

Um die Oberfläche der Metalle, die durch das Loth verbunden werden sollen, zu reinigen, bestreicht man sie mit etwas Zinkchloridlösung (erhalten durch Lösung von Zink in Salzsäure bis zur Sättigung).

Gegenstände, die man direct in die Flamme bringen kann, benetzt man an der Löthstelle mit etwas Löthwasser und erhitzt sie zusammen mit einem Stückchen Loth. Das Loth zieht sich von selbst in die Fuge. Man kühlt schnell, am besten durch Aufspritzen von Wasser ab.

Fig. 314.

Zum Löthen von Gegenständen, die man nicht in der Flamme erhitzen kann, dient der Löthkolben, bestehend aus einem Kupferstück mit Schneide, das an einem Griff gehalten wird (die kleinsten Formen, bei denen das Kupferstück eine Länge von 1 bis 1,5 cm hat, genügen). Die Schneide des Löthkolbens wird zunächst verzinnt, dazu erhitzt man denselben in der Flamme und reibt ihn dann mit etwas Loth auf einem Stücke Salmiak hin und her, die Schneide überzieht sich mit einer dünnen Lothschicht.

Soll z. B. ein Draht *a* (Fig. 314) an ein Blech *b* gelöthet werden, so biegt man den Draht *a* rechtwinklig um, legt den einen Schenkel auf das Blech *b*, benetzt die Fuge mit Löthwasser, nimmt mit dem erhitzten Löthkolben etwas Loth auf, das an der verzinnten Schneide sehr gut haftet, und überfährt die Fuge mit dem Löthkolben.

Reinigen und Trocknen von Röhren.

1. Um Staub aus einer weiten Röhre zu entfernen, befestigt man am einen Ende eines Fadens einen schweren Körper, etwa ein Stück Kupferdraht, am anderen Ende einen Wattebausch, dann stellt man die Röhre senkrecht, lässt den schweren Körper durch dieselbe fallen und zieht den Wattebausch hindurch.

2. Um fest anhaftende Theile zu entfernen, verbindet man das eine Ende der Röhre durch einen Gummischlauch mit der längeren Röhre einer Wulff'schen bezw. Drechsel'schen Waschflasche, deren kürzere Röhre mit der Saugpumpe verbunden ist, und saugt zuerst Säuren, Salpetersäure, resp. Salzsäure, dann Wasser, Alkohol und schliesslich Aether durch die Röhre. Die Wahl der Säure richtet sich nach der Art der Verunreinigung. Dann legt man ein Chlorcalciumrohr vor und saugt trockene Luft unter gleichzeitigem Anwärmen der Röhre hindurch.

Reinigen und Trocknen von Flaschen.

Man spült dieselben mit den eben angeführten Flüssigkeiten aus (zum Entfernen von Fett benutzt man am besten Benzin), schiebt in sie ein Glasrohr und bläst mittelst des Gebläses, resp. saugt mittelst einer Wasserpumpe unter schwachem Erwärmen Luft hindurch.

Zusammenschweissen von Platin.

Will man ein Platinblech und einen Platindraht zusammenschweissen, so erhitzt man beide in der Gebläseflamme zur Weissgluth, dann vernietet man sie durch einige Hammerschläge auf einem neben der Flamme stehenden kleinen Amboss. Schaden kleine Löcher im Platinblech nicht, so ist es bequemer, in das Platinblech zwei kleine Löcher zu bohren, in denen man den Platindraht befestigt. Dieselben kann man beim Aufschweissen des Drahtes fast vollkommen wieder schliessen.

Behandeln von Glas.

1. Schneiden von Röhren: Man macht mit dem Glasmesser, resp. mit der dreikantigen Glasfeile an der Trennungsstelle einen Ritz und zieht die beiden Rohrhälften aus einander; die Zugrichtung ist etwas gegen die Rohraxe hin gerichtet.

2. Absprengen von Röhren: Man macht einen Ritz, erhitzt ein ausgezogenes Stück Glas in der Gebläseflamme und berührt mit dem entstehenden heissen Glastropfen den Ritz.

3. Abrunden der Enden: Die Enden von Glasröhren sollen stets abgerundet werden; dazu erhitzt man dieselben in einem Bunsenbrenner resp. in einer Gebläseflamme.

4. Biegen von Röhren: Bei nicht zu weiten Röhren geschieht dies am besten über dem Schnittbrenner.

Korkbohren.

Zum Bohren von Löchern in Kork dienen die sogenannten Korkbohrer. Man wählt denjenigen mit dem passenden Durchmesser aus, setzt den Kork auf den Tisch und dreht den genau senkrecht auf denselben gestellten, unten mit etwas Oel benetzten Bohrer langsam nach unten. Ist der Kork lang, so zieht man den Bohrer von Zeit zu Zeit heraus und stösst das losgebohrte Stück mit dem nächst kleineren Bohrer aus ihm heraus.

Trocknen und Reinigen von Quecksilber.

1. **Reinigen des Quecksilbers von anhaftenden Staubtheilchen** geschieht entweder dadurch, dass man dasselbe durch eine aus Fliesspapier zusammengedrehte Düte mit feiner Oeffnung an der Spitze fliessen lässt, wobei Staubtheilchen an den Papierwänden hängen bleiben, oder besser durch Filtriren durch Waschleder in dem Apparate Fig. 315. Der Trichter A wird von dem Holzständer B getragen. An denselben ist das Rohr D angeschmolzen, welches unten bei C umgekröpft ist. Hier ist ein Stück Waschleder umgebunden. Giesst man Quecksilber in A, so tritt dasselbe in einem feinen Sprühregen von allen mechanischen Beimengungen gereinigt durch das Leder aus.

Fig. 315.

A D B C

Alle Arbeiten mit Quecksilber müssen auf einem mit einem circa 2 cm hohen Rande versehenen Tische oder in einem entsprechenden grösseren Kasten ausgeführt werden.

2. Zum Reinigen des Quecksilbers von gelösten Metallen muss man es mit Salpetersäure oder besser mit einer Lösung von 5 gr Kaliumbichromat und 5 cbcm Schwefelsäure in 1 Liter Wasser übergiessen und nachher sorgfältig auswaschen.

3. Zum Trocknen des Quecksilbers erwärmt man es unter Umrühren mit einem Glasstabe in einer auf einem Drahtnetze stehenden Porcellanschale auf etwas über 100°. Ob das Quecksilber diese Temperatur hat, erkennt man an dem Verdampfen eines auf das Quecksilber gespritzten Wassertropfens.

Die vollkommenste Reinigung erzielt man durch Destillation des Quecksilbers in besonders construirten Glasapparaten.

Amalgamiren.

Zum **Amalgamiren** des Zinks reinigt man das Zink mechanisch, taucht es dann in verdünnte Salzsäure, nimmt es heraus, giesst etwas Quecksilber auf seine Oberfläche und breitet dasselbe durch Bürsten mit einer groben, zweckmässig mit Kupferdraht gebundenen Bürste über die ganze Oberfläche aus. Zinkcylinder für Elemente müssen auf der äusseren und inneren Oberfläche amalgamirt werden.

Zum **Amalgamiren** von Drähten taucht man das mit Schmirgelpapier blank gemachte Ende des Kupferdrahtes in etwas Salpetersäure in einem Schälchen und gleich darauf in Quecksilber.

Tabellen.

Im Folgenden geben wir eine Reihe von Tabellen; eine Anzahl anderer befindet sich im Text; auf diese ist hier nur verwiesen.

1. Atomgewicht und Dichte der Elemente (Tabelle S. 75).

2. Reduction einer mit Messinggewichten ausgeführten Wägung auf den leeren Raum.

(Aus F. Kohlrausch's Leitfaden, 8. Aufl., Tabelle 8.)

Wiegt ein Körper von der Dichtigkeit d in der Luft m Gramm, so sind mk Milligramm hinzuzuzählen, um die Wägung auf den luftleeren Raum zu reduciren.

d	k	d	k	d	k	d	k
0,9	+ 1,19	1,7	+ 0,56	4,5	+ 0,124	9	— 0,009
1,0	1,06	1,8	0,52	5,0	0,097	10	0,023
1,1	0,95	1,9	0,49	5,5	0,075	11	0,034
1,2	0,86	2,0	0.46	6,0	0,057	12	0,043
1,3	0,78	2,5	0,337	6,5	0,042	13	0,050
1,4	0,71	3,0	0,257	7,0	0,029	14	0,057
1,5	0,66	3,5	0,200	7,5	0,017	15	0,063
1,6	0,61	4,0	0,157	8,0	0,007		

3a. Dichte einiger fester und flüssiger Körper.

(Nach F. Kohlrausch's Leitfaden, Tabelle 1.)

Bleiglanz	7,65	Quarz	2,65	Anilin . . bei 15°	1,013
Bronze	8,7	Wachs	0,96	Benzol „	0,884
Eisen . . . . ca.	7,8	Wismuth	9,9	Chloroform „	1,499
Elfenbein	1,9	Zinkblende	4,06	Essigsäure „	1,053
Glas	2,4—2,6	Zink	7,1	Glycerin „	1,260
Flintglas	3,0—5,9	Eis	0,9167	Olivenöl „	0,91
Kalkspath	2,71	Aether . bei 15°	0,720	Schwefelkohlst. „	1,270
Kork	0,2	Alkohol . . „	0,7937	Terpentinöl „	0,87
Messing	8,1—8,6	Ameisensäure „	1,22	Toluol „	0,89
Neusilber	8,5	Amylalkohol „	0,81	Quecksilber bei 0°	13,596

3b. Dichte gasförmiger Körper.

(Aus F. Kohlrausch's Leitfaden, Tabelle 1.)

Nach Regnault, Jolly, Leduc, Rayleigh, zusammengestellt von Rayleigh und Ramsay	Wasser = 1 bei 0° u. 760 mm unter 45° Breite	Luft = 1	Sauerst. = 16
		bei gleicher Temperatur und gleichem Drucke	
Luft	0,001 2930	1,C000	14,477
Sauerstoff	0,001 4291	1,1052	16,000
Stickstoff („atm.“ 0,0012571) .	0,001 2507	0,9672	14,002
Wasserstoff	0,000 08988	0,06951	1,0063
Kohlensäure	0,001 965	1,520	22,00
Knallgas	0,000 5363	0,4148	6,00
Wasserdampf	(0,000 804)	0,622	9,00

4. Dichte des Wassers bei verschiedenen Temperaturen.

(Aus F. Kohlrausch's Leitfaden, Tabelle 4.)

t	*d*	*t*	*d*	*t*	
0°	0,999874	10	0,999731	20	0,99824
1	0,999930	11	0,99964	21	0,99802
2	0,999970	12	0,99953	22	0,99780
3	0,999993	13	0,99941	23	0,99757
4	1,000000	14	0,99928	24	0,99733
5	0,999992	15	0,99913	25	0,99707
6	0,999969	16	0,99898	26	0,99681
7	0,999931	17	0,99881	27	0,99654
8	0,999878	18	0,99863	28	0,99626
9	9,999812	19	0,99844	29	0,99597
				30	0,99567

5. Specifisches Volumen des Wassers, d. h. Volumen eines Grammes Wasser in Cubikcentimetern zwischen 0 und 100°.

(Aus F. Kohlrausch's Leitfaden, Tabelle 5.)

Temperatur	Volumen	Zunahme auf 1°	Temperatur	Volumen	Zunahme auf 1°
0°	1,00012		60°	1,0170	
4	1,00000		65	1,0197	0,00054
10	1,00027		70	1,0226	58
15	1,00087	0,00012	75	1,0257	62
20	1,00176	18	80	1,0289	64
25	1,00294	23	85	1,0322	66
30	1,00435	28	90	1,0357	70
35	1,0059	32	95	1,0394	74
40	1,0077	36	99	1,04247	77
45	1,0097	40	100	1,04327	0,00080
50	1,0120	46			
55	1,0144	48			
		0,00052			

6. Dichte des Quecksilbers *d* bei verschiedenen Temperaturen *t*:

t	*d*	*t*	*d*
0°	13,595	40°	13,497
5	13,583	50	13,473
10	13,571	60	13,449
15	13,558	70	13,424
20	13,546	80	13,400
25	13,534	90	13,376
30	13,522	100	13,352

7. Dichte wässeriger Lösungen bei 15°, bezogen auf Wasser von 4° C. (Aus F. Kohlrausch's Leitfaden, Tabelle 3.)

Proc.	KOH	KCl	NH_3	$NaOH$	$NaCl$	$ZnSO_4$	$CuSO_4$
0	0,999	0,9991	0,999	0,999	0,9991	0,999	0,999
5	1,045	1,0316	0,978	1,057	1,0354	1,052	1,051
10	1,092	1,0649	0,958	1,113	1,0724	1,108	1,106
15	1,141	1,0994	0,941	1,169	1,1105	1,168	1,166
20	1,191	1,1351	0,924	1,226	1,1501	1,236	(1,23)
25	1,242	(1,172)	0,910	1,281	1,1913	1,307	
30	1,295		0,896	1,335		1,382	
35	1,349		0,883	1,389			
40	1,406			1,440			
45	1,466			1,49			
50	1,53			1,54			

Proc.	$AgNO_3$	$Pb\bar{A}_2$	HCl	HNO_3	H_2SO_4	Alkohol	Zucker bei 17,5°
0	0,999	0,999	0,9991	0,999	0,9991	0,9991	0,9987
5	1,043	1,037	1,0242	1,028	1,0334	0,9904	1,0184
10	1,090	1,076	1,0492	1,057	1,0687	0,9831	1,0388
15	1,141	1,119	1,0744	1,088	1,1051	0,9769	1,0600
20	1,197	1,164	1,1001	1,120	1,1430	0,9708	1,0819
25	1,257	1,213	1,1262	1,153	1,1816	0,9644	1,1047
30	1,323	1,266	1,1524	1,186	1,223	0,9569	1,1282
35	1,396	1,324	1,1775	1,219	1,264	0,9485	1,1526
40	1,479	1,388	1,203	1,252	1,307	0,9390	1,1780
45	1,572			1,285	1,352	0,9287	1,2041
50	1,677			1,318	1,399	0,9179	1,2313
55	1,792			1,348	1,449	0,9068	1,2593
60	1,919			1,375	1,503	0,8954	1,2883
65				1,400	1,559	0,8838	1,3183
70				1,422	1,616	0,8720	1,3494
75				1,442	1,675	0,8601	1,3813
80				1,461	1,733	0,8479	
85				1,478	1,785	0,8354	
90				1,494	1,819	0,8224	
95				1,51	1,839	0,8086	
100				1,53	1,8384	0,7937	

8. Reduction eines Gasvolumens auf 0° und 760 mm.

(Nach H. Landolt und Börnstein, Tabellen, Tabelle 5.)

Hat bei der Temperatur t und dem Quecksilberdruck H ein Gas das Volumen v, so ist das Volumen bei 0° und 760 mm Druck:

$$v_0 = \frac{v}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H}{760}.$$

Die Tabelle enthält die Werthe von $1/(1 + \alpha t)$ ($\alpha = 0{,}00367$ angenommen) und von $H/760$ und ihre Logarithmen. Mit ihnen muss man das gefundene Volumen v multipliciren, um das Volumen bei 0° zu erhalten.

t	$Log \frac{1}{1+\alpha t}$	$\frac{1}{1+\alpha t}$	t	$Log \frac{1}{1+\alpha t}$	$\frac{1}{1+\alpha t}$	t	$Log \frac{1}{1+\alpha t}$	$\frac{1}{1+\alpha t}$
0	0,0000	1,0000	40	0,9405—1	0,8720	80	0,8882—1	0,7731
1	0,9984—1	0,9964	41	9391	8692	81	8870	7709
2	9968	9927	42	9377	8665	82	8857	7687
3	9952	9891	43	9364	8637	83	8845	7665
4	9937	9856	44	9350	8610	84	8833	7644
5	9921	9820	45	9336	8583	85	8821	7623
6	9905	9785	46	9322	8556	86	8809	7601
7	9890	9750	47	9309	8529	87	8797	7580
8	9874	9715	48	9295	8502	88	8784	7559
9	9859	9681	49	9282	8476	89	8772	7538
10	9843	9646	50	9268	8450	90	8760	7517
11	9828	9612	51	9255	8424	91	8748	7496
12	9813	9578	52	9241	8398	92	8737	7476
13	9798	9545	53	9228	8372	93	8725	7456
14	9782	9511	54	9215	8346	94	8713	7435
15	9767	9478	55	9201	8321	95	8701	7415
16	9752	9445	56	9188	8295	96	8689	7395
17	9737	9413	57	9175	8270	97	8677	7375
18	9722	9380	58	9162	8245	98	8666	7355
19	9707	9348	59	9149	8220	99	8654	7335
20	9692	9316	60	9136	8196	100	8642	7315
21	9678	9285	61	9123	8171	101	8631	7296
22	9663	9253	62	9110	8146	102	8619	7276
23	9648	9222	63	9097	8122	103	8607	7257
24	9633	9191	64	9084	8098	104	8596	7238
25	9619	9160	65	9071	8074	105	8584	7218
26	9604	9129	66	9058	8050	106	8573	7199
27	9590	9099	67	9045	8026	107	8561	7181
28	9575	9068	68	9032	8003	108	8550	7162
29	9561	9038	69	9020	7980	109	8539	7143
30	9546	9008	70	9007	7956	110	8527	7124
31	9532	8979	71	8994	7933	111	8516	7106
32	9518	8949	72	8982	7910	112	8505	7087
33	9503	8920	73	8969	7887	113	8493	7069
34	9489	8891	74	8957	7864	114	8482	7050
35	9475	8862	75	8944	7842	115	8471	7032
36	9461	8833	76	8932	7819	116	8460	7014
37	9447	8805	77	8919	7797	117	8448	6996
38	9433	8776	78	8907	7775	118	8437	6978
39	9419	8748	79	8894	7752	119	8426	6960
40	9405	8720	80	8882	7731	120	8415	9943

H	$Log \frac{H}{760}$	$\frac{H}{760}$	H	$Log \frac{H}{760}$	$\frac{H}{760}$
680	0,9517—1	0,8947	730	0,9825—1	0,9605
681	9523	8960	731	9831	9618
682	9530	8974	732	9837	9632
683	9536	8987	733	9843	9645
684	9543	9000	734	9849	9658
685	9549	9013	735	9855	9671
686	9555	9026	736	9861	9684
687	9562	9040	737	9867	9698
688	9568	9053	738	9873	9711
689	9574	9066	739	9878	9724
690	9580	9079	740	9884	9737
691	9587	9092	741	9890	9750
692	9593	9105	742	9896	9763
693	9599	9118	743	9902	9776
694	9606	9132	744	9908	9790
695	9612	9145	745	9914	9803
696	9618	9158	746	9919	9816
697	9624	9171	747	9925	9829
698	9631	9184	748	9931	9842
699	9637	9198	749	9937	9855
700	9643	9211	750	9943	9869
701	9649	9224	751	9948	9882
702	9655	9237	752	9954	9895
703	9662	9250	753	9960	9908
704	9668	9263	754	9966	9921
705	9674	9276	755	9971	9934
706	9680	9289	756	9977	9947
707	9686	9303	757	9983	9961
708	9692	9316	758	9989	9974
709	9698	9329	759	9994	9987
710	9705	9342	760	1,0000—1	1,0000
711	9711	9355	761	0006	0013
712	9717	9368	762	0011	0026
713	9723	9382	763	0017	0040
714	9729	9395	764	0023	0052
715	9735	9408	765	0028	0066
716	9741	9421	766	0034	0080
717	9747	9434	767	0040	0092
718	9753	9448	768	0045	0105
719	9759	9461	769	0051	0118
720	9765	9474	770	0057	0132
721	9771	9487	771	0062	0145
722	9777	9500	772	0068	0158
723	9783	9513	773	0074	0171
724	9789	9526	774	0079	0184
725	9795	9539	775	0085	0197
726	9801	9552	776	0090	0210
727	9807	9566	777	0096	0224
728	9813	9579	778	0102	0237
729	9819	9592	779	0107	0250
730	9825	9605	780	0113	0263

9. Löslichkeit einiger Stoffe in Wasser.

(Aus F. Kohlrausch's Leitfaden, Tabelle 10a.)

100 Gewichtstheile Wasser lösen Gewichtstheile wasserfreien Salzes

bei der Temperatur:	0^0	20^0	100^0
KCl	28	35	57
KJ	128	144	209
$KClO_3$	3	7	56
KNO_3	13	31	250
K_2SO_4	8	11	26
$K_2Cr_2O_7$	5	12	94
K_2CO_3	89	112	156
NH_4Cl	28	37	73
$NaCl$	35,5	36,0	39,6
Na_2CO_3	7	21	45
$LiCl$	64	81	130
$BaCl_2$	31	36	59
$CaCl_2$	50	74	155
$CaSO_4$	0,19	0,21	0,17
$MgSO_4$	27	36	74?
$ZnSO_4$	43	53	95?
$CuSO_4$	18	24	75?
$NiSO_4$	29	40	—
$AgNO_3$	122	240	900
Rohrzucker	179	204	490

10. Linearer Ausdehnungscoëfficient für 1° C.

(Nach F. Kohlrausch's Leitfaden, Tabelle 9.)

(Die Länge L wächst für 1^0 um βL, das Volumen V um $3\beta V$.)

Aluminium	$\beta = 0{,}000023$	Messing	$\beta = 0{,}000019$
Blei	29	Neusilber	18
Eisen	12	Platin	09
Glas	08	Silber	19
Gold	15	Zink	29
Hartgummi	80	Zinn	23
Kupfer	17		

11. Specifische Wärme.

(Zum Theil nach F. Kohlrausch's Leitfaden, Tabelle 16.)

Blei	15—100°	0,032	Zinkblende	15—100°	0,123
Eisen	„	0,113	Zinnstein	„	0,093
Gold	„	0,032			
Graphit	„	0,202	Glas	„	0,19
Kupfer	„	0,093	Messing	„	0,093
Nickel	„	0,11			
Platin	„	0,032	Quecksilber bei	15°	0,0332
Silber	„	0,056	„	„ 50°	0,0330
Zink	„	0,094	„	„ 100°	0,0326
Zinn	„	0,055	„	„ 150°	0,0320
			Alkohol	„ 17°	0,58
Bleiglanz	„	0,051	Anilin	„ „	0,49
Kalkspath	„	0,206	Terpentinöl	„ „	0,43
Quarz	„	0,190	Wasser	„ „	1[1]

[1]) Vergl. S. 177 die specifische Wärme des Wassers für verschiedene Temperaturen.

12. Siedepunkte *t* des Wassers bei verschiedenen Barometerständen *b* (nach F. Kohlrausch, Leitfaden, Tab. 13b):

b	*t*	*b*	*t*
690	97,32°	745 mm	99,44°
700 mm	97,71°	750 „	99,63°
710 „	98,11°	755 „	99,81°
720 „	98,49°	760 „	100,00°
730 „	98,88°	765 „	100,18°
735 „	99,07°	770 „	100,37°
740 „	99,25°	775 „	100,55°

13. Dampfdruck δ des gesättigten Wasserdampfes und Gehalt *g* an Wasserdampf von 1 cbm Luft bei der Temperatur *t*: (Aus F. Kohlrausch's Leitfaden, Tabelle 13.)

t	δ	*gr*	*t*	δ	*gr*
— 20°	0,927	1,2	13°	11,1	11,2
— 15	1,400	1,8	14	11,9	12,0
— 10	2,0	2,2	15	12,7	12,8
— 5	3,0	3,3	16	13,5	13,5
0	4,6	4,9	17	14,4	14,4
1	4,9	5,2	18	15,3	15,2
2	5,3	5,6	19	16,3	16,2
3	5,7	6,0	20	17,4	17,2
4	6,1	6,4	21	18,5	18,2
5	6,5	6,8	22	19,6	19,2
6	7,0	7,3	23	20,9	20,4
7	7,5	7,8	24	22,2	21,6
8	8,0	8,2	25	23,5	22,8
9	8,5	8,7	26	25,0	24,2
10	9,1	9,3	27	26,5	25,6
11	9,8	10,0	28	28,1	27,0
12	10,4	10,6	29	29,7	28,5

14. Spannkraft des Quecksilberdampfes in Millimetern Quecksilber. (Aus F. Kohlrausch's Leitfaden, Tabelle 14.)

20	0,001	200	17,6
40	0,01	220	33,4
60	0,03	240	57
80	0,09	260	97
100	0,28	280	156
120	0,75	300	244
140	1,8	320	371
160	4,2	340	548
180	8,9	360	791

15. Spannkraft des Aetherdampfes vergl. S. 155.

16. Gefrierpunktserniedrigung und Siedepunktserhöhung vergl. S. 165 und 168.

17. Wellenlängen der wichtigsten Linien einer Reihe von Elementen und des Sonnenspectrums.

(Nach F. Kohlrausch's Leitfaden, Tabelle 19a.)

	10^{-6} mm		10^{-6} mm
Kalium α	768	E	527,0
A	759,4	b (Mg Mittellinie)	517,3
a	718,6	F (Wasserstoff β)	486,1
B	686,7	Strontium δ	460,8
Lithium α	670,8	Wasserstoff γ	434,0
C (Wasserstoff α)	656,3	G	430,8
D_1 Natrium	589,62	h (Wasserstoff δ)	410,2
D_2 Natrium	589,02	Kalium β	404,6
Thallium	535,1	H_1	396,9

18. Brechungsindices einiger Körper.

(Nach F. Kohlrausch's Leitfaden, Tabelle 20.)

Wellenlänge $\lambda . 10^6 =$ mm	*A* 759,4	*B* 686,7	*C* 656,3	*D* 589,3	*E* 527,0	*F* 486,1	430,8	*H* 396,9
Wasser 18⁰	1,3293	1,3308	1,3317	1,3334	1,3356	1,3377	1,3411	1,3440
Alkohol 15,0⁰	3598	3611	3618	3635	3658	3679	3716	3748
Schwefelkohlst. 16,0⁰	6118	6181	6214	6308	6438	6555	6800	7032
Cassiaöl 17⁰	586	592	596	605	619	634	665	701
Crownglas leicht	5100	5118	5127	5153	5186	5214	5267	5312
Crownglas schwer	6097	6117	6126	6152	6185	6213	6265	6308
Flintglas . leicht	5986	6020	6038	6085	6145	6200	6308	6404
Flintglas . schwer	7350	7405	7434	7515	7623	7723	7922	811
Kalkspath ord.	6500	6530	6545	6585	6635	6679	6762	6833
Kalkspath extr.	4827	4840	4847	4864	4888	4908	4946	4978
Quarz . . ord.	5390	5409	5418	5442	5471	5497	5543	5582
Quarz . . extr.	5481	5500	5509	5533	5563	5589	5637	5677
Gyps mitt.	517	519	520	523	525	528	532	
Arragonit mitt. . . .	672	676	678	682	686	691	698	705
Topas (sibir.) mitt. .	608	610	611	614	617	619	624	627
Steinsalz	5367	5392	5405	5442	5490	5532	5613	5688
Flussspath	4310	4320	4325	4339	4355	4371	4398	4420
Drehung in Quarz bei 20⁰	12,7⁰	15,7⁰	17,3⁰	21,72⁰	27,5⁰	32,8⁰	42,6⁰	51,2⁰

Für 1⁰ Temperaturerhöhung nimmt bei mittlerer Temperatur der Brechungsindex ab bei Wasser um 0,00009, bei CS_2 für *D* um 0,0008, für *H* um 0,0009.

19. Elektricitätsleitung einiger Metalle.

(Aus F. Kohlrausch's Leitfaden, Tab. 25.)

Bei 18^0	Spec. Widerstand. Ein 1 m langer Draht von 1 mm^2 Querschnitt hat den Widerstand in Ohm	Leitungsvermögen, bezogen auf Quecksilber von 0^0
Silber	$\sigma = 0{,}016$	$k = 59$
Kupfer	0,0172	55
Gold	0,023	41
Zink	0,063	15
Eisen	0,09 bis 0,15	6 bis 10
Stahl	0,15 bis 0,5	2 bis 6
Platin	0,14	6,5
Blei	0,21	4,6
Antimon	0,45	2,1
Quecksilber	0,958	0,984
Wismuth	1,2	0,8
Gaskohle etwa	50	0,02
Messing	0,07 bis 0,09	10 bis 14
20 Proc. Platin-Silber	0,20	4,8
Neusilber	0,16 bis 0,40	2,4 bis 6
Nickelin	0,42	2,3
30 Proc. Mangan-Kupfer	1,08	0,9

Die Aenderung des Widerstandes α mit der Temperatur für 1^0, d. h. also der Coëfficient α in der Gleichung $w_t = w_0 (1 + \alpha t)$, ist für: Quecksilber $\alpha = 0{,}00088$, reine feste Metalle $\alpha = 0{,}004$, Neusilber $\alpha = 0{,}00023$ bis 0,0006, gutes Nickelin $\alpha = 0{,}00023$. Für Manganin $\sigma = 0{,}43$ (84 Cu, 4 Ni, 12 Mn) und Constantan $\sigma = 0{,}50$ (60 Cu, 40 Ni) ist α fast Null. Bei der Kohle nimmt der Widerstand mit der Temperatur ab, er ist $\alpha = -0{,}0002$ bis $-0{,}0008$.

20. Elektrisches Leitvermögen einiger Salze und Säuren in wässeriger Lösung bei 18^0, bezogen auf Quecksilber von 0^0.

(Aus F. Kohlrausch's Leitfaden, Tabelle 26.)

Die Procente bedeuten Gewichtstheile des gelösten Körpers, und zwar bei Salzen des wasserfreien Salzes, in 100 Gewichtstheilen der Lösung.

k ist das Leitvermögen bei 18^0, Δk ist die Zunahme von k für 1^0 in Procenten von k.

Lösung	KCl $10^7 k$	KCl Δk	NaCl $10^7 k$	NaCl Δk	$CuSO_4$ $10^7 k$	$CuSO_4$ Δk
5 Proc.	64	2,0	63	2,2	18	2,2
10 „	127	1,9	113	2,1	30	2,2
15 „	189	1,8	153	2,1	39	2,3
20 „	250	1,7	183	2,2		
25 „			200	2,3		

Lösung	$ZnSO_4$ 10^7k	$\varDelta k$	HCl 10^7k	$\varDelta k$	H_2SO_4 10^7k	$\varDelta k$	HNO_3 10^7k	$\varDelta k$
5 Proc.	18	2,3	369	1,59	195	1,21	241	1,50
10 „	30	2,3	590	1,57	366	1,28	431	1,45
15 „	39	2,3	698	1,56	508	1,36	573	1,40
20 „	43	2,4	713	1,55	611	1,45	665	1,38
25 „	44	2,6	677	1,54	671	1,54	720	1,38
30 „	41	3,0	620	1,53	691	1,62	734	1,39
35 „	33	4,0	553	1,52	678	1,70	719	1,43
40 „			483		636	1,78	686	1,49
50 „					505	1,93	590	1,6
60 „					349	2,13	480	1,6
70 „					202	2,56	370	1,5
80 „					103	3,49	250	1,3

21. Elektrochemische Aequivalente vergl. S. 352.

22. Werthe von $\frac{a}{1000 - a}$ für $a = 1$ bis $a = 999$. (Entnommen aus W. Ostwald, Handbuch für physico-chemische Messungen, S. 369.)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
00	0,0000	0010	0020	0030	0040	0050	0060	0071	0081	0091
01	101	111	122	132	142	152	163	173	183	194
02	204	215	225	235	246	256	267	278	288	299
03	309	320	331	341	352	363	373	384	395	406
04	417	428	438	449	460	471	482	493	504	515
05	526	537	549	560	571	582	593	605	616	627
06	638	650	661	672	684	695	707	718	730	741
07	753	764	776	788	799	811	823	834	846	858
08	870	881	893	905	917	929	941	953	965	977
09	989	1001	1013	1025	1038	1050	1062	1074	1087	1099
10	0,1111	124	136	148	161	173	186	198	211	223
11	236	249	261	274	287	299	312	325	338	351
12	364	377	390	403	416	429	442	455	468	481
13	494	508	521	534	547	561	574	588	601	614
14	628	641	655	669	682	696	710	723	737	751
15	765	779	793	806	820	834	848	862	877	891
16	905	919	933	947	962	976	990	2005	2019	2034
17	0,2048	2063	2077	2092	2107	2121	2136	151	166	180
18	195	210	225	240	255	270	285	300	315	331
19	346	361	376	392	407	422	438	453	469	484
20	500	516	531	547	563	579	595	610	626	642
21	658	674	690	707	723	739	755	771	788	804
22	821	837	854	870	887	903	920	937	953	970
23	987	3004	3021	3038	3055	3072	3089	3306	3123	3141
24	0,3158	175	193	210	228	245	263	280	298	316
25	333	351	369	387	405	423	441	459	477	495
26	514	532	550	569	587	605	624	643	661	680
27	699	717	736	755	774	793	812	831	850	870
28	889	908	928	947	967	986	4006	4025	4045	065
29	0,4085	4104	4124	4144	4164	4184	205	225	245	265

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	0,4286	306	327	347	368	389	409	430	451	472
31	493	514	535	556	577	599	620	641	663	684
32	706	728	749	771	793	815	837	859	881	903
33	925	948	970	993	5015	5038	5060	5083	5106	5129
34	0,5152	5175	5198	5221	244	267	291	314	337	361
35	385	408	432	456	480	504	528	552	576	601
36	625	650	674	699	723	748	773	798	823	848
37	873	898	924	949	974	6000	6026	6051	6077	6103
38	0,6129	6155	6181	6208	6234	260	287	313	340	367
39	393	420	447	475	502	529	556	584	611	639
40	667	695	722	750	779	807	835	863	892	921
41	949	978	7007	7036	7065	7094	7123	7153	7182	7212
42	0,7241	7271	301	331	361	391	422	452	483	513
43	544	575	606	637	668	699	731	762	794	825
44	857	889	921	953	986	8018	8051	8083	8116	8149
45	0,8182	8215	8248	8282	8315	349	382	416	450	484
46	519	553	587	622	657	692	727	762	797	832
47	868	904	939	975	9011	9048	9084	9121	9157	9194
48	0,9231	9268	9305	9342	380	418	455	493	531	570
49	608	646	685	724	763	802	841	881	920	960
50	1,000	004	008	012	016	020	024	028	033	037
51	041	045	049	053	058	062	066	070	075	079
52	083	088	092	096	101	105	110	114	119	123
53	128	132	137	141	146	151	155	160	165	169
54	174	179	183	188	193	198	203	208	212	217
55	222	227	232	237	242	247	252	257	262	268
56	273	278	283	288	294	299	304	309	315	320
57	326	331	336	342	347	353	358	364	370	375
58	381	387	392	398	404	410	415	421	427	433
59	439	445	451	457	463	469	475	481	488	494
60	500	506	513	519	525	532	538	545	551	558
61	564	571	577	584	591	597	604	611	618	625
62	632	639	646	653	660	667	674	681	688	695
63	703	710	717	725	732	740	747	755	762	770
64	778	786	793	801	809	817	825	833	841	849
65	857	865	874	882	890	899	907	915	924	933
66	941	950	959	967	976	985	994	2,003	2,012	2,021
67	2,030	040	049	058	067	077	086	096	106	115
68	125	135	145	155	165	175	185	195	205	215
69	226	236	247	257	268	279	289	300	311	322
70	333	344	356	367	378	390	401	413	425	436
71	448	460	472	484	497	509	521	534	546	559
72	571	584	597	610	623	636	650	663	676	690
73	704	717	731	745	759	774	788	802	817	831
74	846	861	876	891	906	922	937	953	968	984
75	3,000	016	032	049	065	082	098	115	132	149
76	167	184	202	219	237	255	274	292	310	329
77	348	367	386	405	425	444	464	484	505	525
78	545	566	587	608	630	651	673	695	717	739
79	762	785	808	831	854	878	902	926	950	975

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
80	4,000	025	051	076	102	128	155	181	208	236
81	263	291	319	348	376	405	435	465	495	525
82	556	587	618	650	682	714	747	780	814	848
83	882	917	952	988	5,024	5,061	5,098	5,135	5,173	5,211
84	5,250	289	329	369	410	452	494	536	579	623
85	667	711	757	803	849	897	944	993	6,042	6,092
86	6,143	194	246	299	353	407	463	519	576	634
87	692	752	813	874	937	7,000	7,065	7,130	7,197	7,264
88	7,333	403	475	547	621	696	772	850	929	8,009
89	8,091	174	259	346	434	524	615	709	804	901
90	9,000	101	204	309	417	526	638	753	870	989
91	10,11	10,23	10,36	10,49	10,63	10,77	10,90	11,05	11,20	11,35
92	11,50	11,66	11,82	11,99	12,16	12,33	12,51	12,70	12,89	13,08
93	13,29	13,49	13,71	13,93	14,15	14,38	14,63	14,87	15,13	15,39
94	15,67	15,95	16,24	16,54	16,86	17,18	17,52	17,87	18,23	18,61
95	19,00	19,41	19,83	20,28	20,74	21,22	21,73	22,26	22,81	23,39
96	24,00	24,64	25,32	26,03	26,78	27,57	28,41	29,30	30,25	31,26
97	32,33	33,48	34,71	36,04	37,46	39,00	40,67	42,48	44,45	46,62
98	49,00	51,6	54,6	57,8	61,5	65,7	70,4	75,9	82,3	89,9
99	99,0	110	124	142	166	199	249	332	499	999

Trigonometrische Tafel, Einrichtung und Gebrauch derselben.

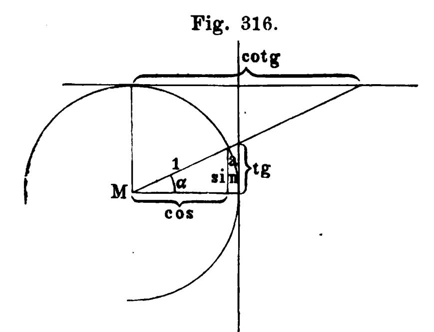
Fig. 316 veranschaulicht die trigonometrischen Functionen; sie sind die Anzahl von Längeneinheiten gewisser Linien im und am Kreise, falls der Radius desselben gleich 1 ist; sie sind also unbenannte Zahlen.

Die folgende Tafel enthält für Winkel von 0 bis 45⁰ den Sinus, die Tangente, die Cotangente und den Cosinus von Grad zu Grad. Da aber

$$sin\ (90 - \alpha) = cos\ \alpha \qquad tg\ (90 - \alpha) = ctg\ \alpha$$
$$cos\ (90 - \alpha) = sin\ \alpha \qquad ctg\ (90 - \alpha) = tg\ \alpha$$

ist, so kann man die Tafel auch für die Winkel zwischen 45 und 90⁰ benutzen: Ist der Winkel kleiner als 45⁰, so benutzt man den vorderen Eingang der Tafel, die oben stehenden Worte bezeichnen die Columnen, in denen die einzelnen trigonometrischen Functionen stehen; so ist:

Fig. 316.



$sin\ 33^0 = 0{,}5446 \qquad tg\ \ 19^0 = 0{,}3443$
$cos\ 39^0 = 0{,}7771 \qquad ctg\ 43^0 = 1{,}072$

Ist der Winkel grösser als 45⁰, so benutzt man den hinteren Eingang der Tafel, die unten stehenden Worte bezeichnen dann die Columnen, in denen die einzelnen trigonometrischenFunctionenstehen; so ist:

$sin\ 47^0 = 0{,}7314 \qquad tg\ \ 72^0 = 3{,}078$
$cos\ 52^0 = 0{,}6157 \qquad ctg\ 87^0 = 0{,}0524.$

Hinter jeder Hauptcolumne steht eine kleinere mit D. I⁰ überschriebene Columne. Die in diesen Columnen stehenden Zahlen geben an, um wie viel jeder der beiden Functionswerthe, zwischen denen sie stehen, sich für einen Grad ändert. Sucht man zu einer bestimmten Anzahl von Minuten den zugehörigen Werth der trigonometrischen Functionen, so dividirt man diese Zahlen durch 60 und multiplicirt mit der Minutenziffer der aufzuschlagenden Winkel und addirt das Product zu dem nächst vorhergehenden Functionswerthe, wenn die Function (Sinus und Tangente) bei wachsendem Winkel wächst, zieht sie dagegen von diesem ab, wenn die Function (Cosinus und Cotangente) bei wachsendem Winkel abnimmt.

	Sinus	D 1⁰	Tangens	D 1⁰	Cotangens	D 1⁰	Cosinus	D 1⁰	
0 ↓	0,0000	175	0,0000	175	∞		1,0000	02	90
1	0,0175	174	0,0175	174	57,29		0,9998	04	89
2	0,0349	174	0,0349	175	28,64		0,9994	08	88
3	0,0523	175	0,0524	175	19,08		0,9986	10	87
4	0,0698	174	0,0699	176	14,30		0,9976	14	86
5	0,0872	173	0,0875	176	11,43		0,9962	17	85
6	0,1045	174	0,1051	177	9,514		0,9945	20	84
7	0,1219	173	0,1228	177	8,144		0,9925	22	83
8	0,1392	172	0,1405	179	7,115	801	0,9903	26	82
9	0,1564	172	0,1584	179	6,314	643	0,9877	29	81
10	0,1736	172	0,1763	181	5,671	526	0,9848	32	80
11	0,1908	171	0,1944	182	5,145	440	0,9816	35	79
12	0,2079	171	0,2126	183	4,705	374	0,9781	37	78
13	0,2250	169	0,2309	184	4,331	320	0,9744	41	77
14	0,2419	169	0,2493	186	4,011	279	0,9703	44	76
15	0,2588	168	0,2679	188	3,732	245	0,9659	46	75
16	0,2756	168	0,2867	190	3,487	216	0,9613	50	74
17	0,2924	166	0,3057	192	3,271	193	0,9563	52	73
18	0,3090	166	0,3249	194	3,078	174	0,9511	56	72
19	0,3256	164	0,3443	197	2,904	157	0,9455	58	71
20	0,3420	164	0,3640	199	2,747	142	0,9397	61	70
21	0,3584	162	0,3839	201	2,605	130	0,9336	64	69
22	0,3746	161	0,4040	205	2,475	119	0,9272	67	68
23	0,3907	160	0,4245	207	2,356	110	0,9205	70	67
24	0,4067	159	0,4452	211	2,246	101	0,9135	72	66
25	0,4226	158	0,4663	214	2,145	95	0,9063	75	65
26	0,4384	156	0,4877	218	2,050	87	0,8988	78	64
27	0,4540	155	0,5095	222	1,963	82	0,8910	81	63
28	0,4695	153	0,5317	226	1,881	77	0,8829	83	62
29	0,4848	152	0,5543	231	1,804	72	0,8746	86	61
30	0,5000	150	0,5774	235	1,732	68	0,8660	88	60
31	0,5150	149	0,6009	240	1,664	64	0,8572	92	59
32	0,5299	147	0,6249	245	1,600	60	0,8480	93	58
33	0,5446	146	0,6494	251	1,540	57	0,8387	97	57
34	0,5592	144	0,6745	257	1,483	55	0,8290	98	56
35	0,5736	142	0,7002	263	1,428	52	0,8192	102	55
36	0,5878	140	0,7265	271	1,376	49	0,8090	104	54
37	0,6018	139	0,7536	277	1,327	47	0,7986	106	53
38	0,6157	136	0,7813	285	1,280	45	0,7880	109	52
39	0,5293	135	0,8098	293	1,235	43	0,7771	111	51
40	0,6428	133	0,8391	302	1,192	42	0,7660	113	50
41	0,6561	130	0,8693	311	1,150	39	0,7547	116	49
42	0,6691	129	0,9004	321	1,111	39	0,7431	117	48
43	0,6820	127	0,9325	332	1,072	36	0,7314	121	47
44	0,6947	124	0,9657	343	1,036	36	0,7193	122	46 ↑
45	0,7071		1,0000		1,000		0,7071		45⁰
	Cosinus	D 1⁰	Cotangens	D 1⁰	Tangens	D 1⁰	Sinus	D 1⁰	

Einrichtung und Gebrauch der Logarithmentafel.

Die Benutzung der Logarithmen erleichtert die Zifferrechnungen erheblich, denn jede Multiplication ihrer Zahlen verwandelt sich in eine Addition von Logarithmen, jede Division in eine Subtraction, jede Potenzirung in eine Multiplication, jedes Wurzelziehen in eine Division. Man sucht dazu den Logarithmus des zu berechnenden Ausdruckes und zu diesem dann den Numerus, der das gesuchte Resultat liefert.

1. Aufsuchen des Logarithmus. Jeder Logarithmus besteht aus der Kennziffer (Charakteristik) und der Mantisse, die durch ein Komma getrennt sind. Sucht man zu einer gegebenen Zahl den Logarithmus, so zählt man die Stellen vor dem Komma und zieht 1 von dieser Zahl ab; der Rest ist die Kennziffer. Z. B. *Log* 4367, Kennziffer 3; *Log* 27, Kennziffer 1. Einzifferige Zahlen haben die Kennziffer 0. Bei Decimalbrüchen ohne ganze Zahlen (wie 0,06 . . .) lässt man den Logarithmus mit 0 beginnen und fügt die Kennziffer mit dem negativen Vorzeichen versehen dem Logarithmus an; dabei zählt die Kennziffer die Anzahl Nullen, welche der ersten Ziffer vorangehen. Z. B. *Log* 0,2 hat die Form 0, ... — 1, *Log* 0,003764 die Form 0, ... — 3 u. s. w.

Die Mantisse erhält man aus der folgenden mit „Logarithmen" überschriebenen Tafel. Hat man die Kennziffer des Logarithmus festgestellt, so sucht man die gegebene Zahl unter der Columne „Natürliche Zahl" auf, für alle zweizifferigen Zahlen enthält die mit 0 überschriebene Columne die Mantisse, die man dann der Kennziffer anhängt. Z. B. *Log* 27; Kennziffer 1, Mantisse 4314, also *Log* 27 = 1,4314; oder *Log* 0,0000089, Kennziffer 0, ... — 6, Mantisse 9494, also *Log* 0,0000089 = 0,9494 — 6 u. s. w.

Für einzifferige Zahlen ergiebt dieselbe Columne die Mantissen; man denkt sich jede solche Ziffer von einer 0 gefolgt; so ist z. B. *Log* 2 = 0,3010 oder *Log* 9 = 0,9542.

Bei dreizifferigen Zahlen, bei denen die dritte Ziffer von 0 verschieden ist, sucht man die beiden ersten Ziffern in der Columne „Nat. Zahl" auf, die dritte in der Horizontalreihe am Kopfe oder am Fusse der Tafel und entnimmt der entsprechenden Horizontal- und Verticalreihe die Mantisse. Z. B. *Log* 334 000: Kennziffer 5, Mantisse für 334 = 5237, also Logarithmus = 5,5237; oder *Log* 0,0879: Kennziffer 0, ... — 2, Mantisse 9440, also *Log* 0,0879 = 0,9440 — 2.

Sucht man zu einer vierzifferigen Zahl den Logarithmus, so sucht man für die drei ersten Ziffern, so wie angegeben, die Mantisse; die vierte Ziffer sucht man in der von der Tafel der Logarithmen durch zwei Verticalstriche getrennten kleinen Tafel auf und entnimmt dieser die Zahl, welche in derselben Horizontalreihe wie die bereits gefundene Mantisse der drei ersten Ziffern steht. Diese Zahl (der sogenannte Proportionaltheil) wird noch zu der Mantisse zugefügt. Z. B. sei der Logarithmus von 15,36 zu suchen; Kennziffer 1, die Mantisse für 153 ist 1847, dazu giebt die sechste Verticalreihe der kleinen Tafel 17; dieses wird zu 1847 ausgezählt, der *Log* 15,36 ist also 1,1864.

Sind für fünf auf einander folgende Ziffern die Mantissen zu suchen, so verfährt man für die ersten vier, wie soeben angegeben; für die fünfte

sucht man aus der kleinen Tafel den Proportionaltheil, addirt von diesem aber nur den zehnten Theil zur Mantisse. Z. B. *Log* 53,079; Kennziffer 1; die Mantisse für 530 ist 7243, dazu kommen zuerst von der 7 herrührend 6 Einheiten, die fünfte Ziffer 9 liefert noch 0,7 oder rund 1, also ist *Log* 53,079 = 1,7250. Aehnlich *Log* 0,13989; Kennziffer 0, ... — 1, Mantisse 1430 + 26 + 2,9 oder 1459, wenn man 2,9 zu 3 abrundet, also *Log* 0,13989 = 0,1459 — 1 u. s. w.

Mehr als fünfstellige Zahlen behandelt man bei unserer Tafel so, als ob hinter der fünften Ziffer lauter Nullen ständen. Z. B. ist *Log* 3378903 = 6,5287, also gerade so, als ob die Zahl 3378900 hiesse. Für genauere Rechnungen dienen fünf-, sieben- oder mehrstellige Logarithmentafeln.

2. Eigenschaften des Logarithmus.

a) Der Logarithmus des Productes zweier Zahlen ist gleich der Summe der Logarithmen der einzelnen Factoren. Z. B.:

$Log\,(a \,.\, b) = Log\,a + Log\,b$; $Log\,(0{,}03789 \times 33{,}799) = Log\,0{,}03789 + Log\,33{,}799 = 0{,}5785 - 2 + 1{,}5289 = 0{,}1074$.

Andererseits ist: $0{,}03789 \times 33{,}799 = 1{,}28064$ und $Log\,1{,}28064 = 0{,}1074$.

Ist der Logarithmus eines Productes aus mehreren Factoren zu bilden, so addirt man die Logarithmen eines jeden einzelnen: $Log\,(33{,}909 \times 1507{,}3 \times 0{,}0004962) = Log\,33{,}909 + Log\,1507{,}3 + Log\,0{,}0004962 = 1{,}5303 + 3{,}1782 + 0{,}6957 - 4 = 1{,}4042$; der Logarithmus des Productes 25,3613 ist 1,4041.

b) Der Logarithmus des Quotienten zweier Zahlen ist gleich dem Logarithmus des Zählers weniger dem Logarithmus des Nenners.

Beispiel: $Log\,(a/b) = Log\,a - Log\,b$; $Log\,(3397{,}2/0{,}003785) = Log\,3397{,}2 - Log\,0{,}003785 = 3{,}5311 - (0{,}5781 - 3) = 3{,}5311 - 0{,}5781 + 3 = 5{,}9530$. Der Quotient giebt direct berechnet 897543, der Logarithmus davon ist 5,9530.

Enthält der Zähler und Nenner mehrere Factoren, so bildet man erst den Logarithmus des Zählers, dann den des Nenners für sich und subtrahirt dann beide von einander. Der Logarithmus von

$$Log\left(\frac{32 \times 734 \times 0{,}3674}{0{,}00129 \times 760 \times 1{,}0379}\right) = (1{,}5051 + 2{,}8657 + 0{,}5652 - 1) - (0{,}1106 - 3 + 2{,}8808 + 0{,}0161) = 3{,}9360 - 0{,}0075 = 3{,}9285.$$

c) Den Logarithmus einer Potenz einer Zahl erhält man, wenn man den Logarithmus der Zahl mit dem Exponenten multiplicirt.

Beispiel: $Log\,a^x = x Log\,a$; $Log\,(0{,}0035699)^4 = 4 \times Log\,0{,}0035699 = 4 \times (0{,}5526 - 3) = 2{,}2104 - 12 = 0{,}2104 - 10$.

d) Den Logarithmus einer Wurzelgrösse erhält man, wenn man den Logarithmus der Zahl, aus der die Wurzel gezogen werden soll, durch den Wurzelexponenten dividirt.

Beispiel: $Log\,\sqrt[n]{a} = \frac{1}{n}\,Log\,a$.

$Log\,\sqrt[3]{0{,}00002739} = (Log\,0{,}00002739)/3 = (0{,}4376 - 5)/3$. Um bei der Division die gebrochene Kennziffer zu vermeiden, addirt und subtrahirt man so viele Einheiten, dass die mit dem —-Zeichen versehene Ziffer durch den Divisor ohne Rest theilbar ist. Man schreibt z. B. für $0{,}4376 - 5$, ohne etwas am Werthe des Ausdrucks zu ändern, $1 + 0{,}4376 - 5 - 1 = 1{,}4376 - 6$ und dividirt nun erst durch 3; man erhält also

$$Log\,\sqrt[3]{0{,}00002739} = (1{,}4376 - 6)/3 = 0{,}4792 - 2.$$

3. **Aufsuchen des Numerus.** Um die zu einem Logarithmus gehörige Zahl zu finden, benutzt man die mit „Numeri" überschriebene Tafel. Man sucht die ersten beiden Ziffern des Logarithmus nach dem Komma, der Mantisse, in der mit „Log." überschriebenen ersten Columne auf, ferner sucht man die dritte Ziffer der Mantisse am Kopfe oder am Fusse der Tafel auf und entnimmt die Ziffer der entsprechenden Horizontal- und Verticalreihe. Die vierte Ziffer sucht man in der kleinen Tafel rechts und addirt die entsprechende Zahl dieser kleinen Tafel zu der vierzifferigen Zahl, welche man aus der Haupttafel entnommen hat. In der so erhaltenen vierstelligen Zahl setzt man an die Stelle ein Komma, dass vor demselben eine Ziffer mehr steht, als die Kennziffer des Logarithmus anzeigt; ist diese negativ, so schreibt man vor die aus der Tafel entnommenen Ziffern so viele Nullen, als die Kennziffer Einheiten hat und setzt hinter die erste derselben das Komma.

Beispiele: Der Logarithmus ist 1,4041 [vergl. das letzte unter a) gegebene Beispiel]. Für die drei Ziffern 404 giebt die Tafel die Zahl 2535; für die 1 der vierten Stelle giebt die kleine Tafel eine 1, zusammen also 2536. Da 1 die Kennziffer ist, so ist das Komma an die zweite Stelle zu setzen; die Zahl lautet also 25,36. — 0,009743 ist der Numerus von (0,9887 — 3).

4. **Beispiel für die Anwendung der Logarithmenrechnung:**

1) $6{,}345 \cdot 92{,}1 \cdot 0{,}0036 \cdot 2005 = P$

$$\begin{aligned}
Log\ 6{,}345 &= 0{,}8025 \\
Log\ 92{,}1 &= 1{,}9643 \\
Log\ 0{,}0036 &= 0{,}5563 - 3 \\
Log\ 2005 &= 3{,}3021 \\
\hline
Log\ P &= 6{,}6252 - 3 = 3{,}6252 \\
P &= 4219
\end{aligned}$$

2) $$\frac{4{,}567^3 \cdot \sqrt{8{,}9} \cdot 0{,}02}{6{,}81 \cdot \sqrt{0{,}6} \cdot \sqrt{0{,}0007}} = \frac{A}{B} = Q.$$

A.

$Log\ 4{,}567 = 0{,}6597$	$3\ Log\ 4{,}567$	$= 1{,}9791$	
$Log\ 8{,}9 = 0{,}9494$	$\frac{1}{2}\ Log\ 8{,}9$	$= 0{,}4747$	
$Log\ 0{,}02 = 0{,}3010 - 2$	$Log\ 0{,}02$	$= 0{,}3010 - 2$	
	$Log\ A$	$= 2{,}7548 - 2$	$= 0{,}7547$
	$Log\ B$ [1])		$= 0{,}1448 - 1$
	$Log\ A/B = Log A - Log B$		$= 1{,}6099$
	$Q = A/B$		$= 40{,}72$

B.

$Log\ 6{,}81 = 0{,}8331$	$Log\ 6{,}81$	$= 0{,}8331$	
$Log\ 0{,}6 = 0{,}7782 - 1$	$\frac{1}{2}\ Log\ 0{,}6$	$= 0{,}8891 - 1$	
$Log\ 0{,}0007 = 0{,}8451 - 4$	$\frac{1}{2}\ Log\ 0{,}0007$	$= 0{,}4226 - 2$	
	$Log\ B$	$= 2{,}1448 - 3$	$= 0{,}1448 - 1$

[1]) Berechnung von *Log B* siehe unter B.

Nat. Zahl.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0000	0043	0086	0128	0170	0212	0253	0294	0334	0374	4	8	12	17	21	25	29	33	37
11	0414	0453	0492	0531	0569	0607	0645	0682	0719	0755	4	8	11	15	19	23	26	30	34
12	0792	0828	0864	0899	0934	0969	1004	1038	1072	1106	3	7	10	14	17	21	24	28	31
13	1139	1173	1206	1239	1271	1303	1335	1367	1399	1430	3	6	10	13	16	19	23	26	29
14	1461	1492	1523	1553	1584	1614	1644	1673	1703	1732	3	6	9	12	15	18	21	24	27
15	1761	1790	1818	1847	1875	1903	1931	1959	1987	2014	3	6	8	11	14	17	20	22	25
16	2041	2068	2095	2122	2148	2175	2201	2227	2253	2279	3	5	8	11	13	16	18	21	24
17	2304	2330	2355	2380	2405	2430	2455	2480	2504	2529	2	5	7	10	12	15	17	20	22
18	2553	2577	2601	2625	2648	2672	2695	2718	2742	2765	2	5	7	9	12	14	16	19	21
19	2788	2810	2833	2856	2878	2900	2923	2945	2967	2989	2	4	7	9	11	13	16	18	20
20	3010	3032	3054	3075	3096	3118	3139	3160	3181	3201	2	4	6	8	11	13	15	17	19
21	3222	3243	3263	3284	3304	3324	3345	3365	3385	3404	2	4	6	8	10	12	14	16	18
22	3424	3444	3464	3483	3502	3522	3541	3560	3579	3598	2	4	6	8	10	12	14	15	17
23	3617	3636	3655	3674	3692	3711	3729	3747	3766	3784	2	4	6	7	9	11	13	15	17
24	3802	3820	3838	3856	3874	3892	3909	3927	3945	3962	2	4	5	7	9	11	12	14	16
25	3979	3997	4014	4031	4048	4065	4082	4099	4116	4133	2	3	5	7	9	10	12	14	15
26	4150	4166	4183	4200	4216	4232	4249	4265	4281	4298	2	3	5	7	8	10	11	13	15
27	4314	4330	4346	4362	4378	4393	4409	4425	4440	4456	2	3	5	6	8	9	11	13	14
28	4472	4487	4502	4518	4533	4548	4564	4579	4594	4609	2	3	5	6	8	9	11	12	14
29	4624	4639	4654	4669	4683	4698	4713	4728	4742	4757	1	3	4	6	7	9	10	12	13
30	4771	4786	4800	4814	4829	4843	4857	4871	4886	4900	1	3	4	6	7	9	10	11	13
31	4914	4928	4952	4955	4969	4983	4997	5011	5024	5038	1	3	4	6	7	8	10	11	12
32	5051	5065	5079	5092	5105	5119	5132	5145	5159	5172	1	3	4	5	7	8	9	11	12
33	5185	5198	5211	5224	5237	5250	5263	5276	5289	5302	1	3	4	5	6	8	9	10	12
34	5315	5328	5340	5353	5366	5378	5391	5403	5416	5428	1	3	4	5	6	8	9	10	11
35	5441	5453	5465	5478	5490	5502	5514	5527	5539	5551	1	2	4	5	6	7	9	10	11
36	5563	5575	5587	5599	5611	5623	5635	5647	5658	5670	1	2	4	5	6	7	8	10	11
37	5682	5694	5705	5717	5729	5740	5752	5763	5775	5786	1	2	3	5	6	7	8	9	10
38	5798	5809	5821	5832	5843	5855	5866	5877	5888	5899	1	2	3	5	6	7	8	9	10
39	5911	5922	5933	5944	5955	5966	5977	5988	5999	6010	1	2	3	4	5	7	8	9	10
40	6021	6031	6042	6053	6064	6075	6085	6096	6107	6117	1	2	3	4	5	6	8	9	10
41	6128	6138	6149	6160	6170	6180	6191	6201	6212	6222	1	2	3	4	5	6	7	8	9
42	6232	6243	6253	6263	6274	6284	6294	6304	6314	6325	1	2	3	4	5	6	7	8	9
43	6335	6345	6355	6365	6374	6385	6395	6405	6415	6425	1	2	3	4	5	6	7	8	9
44	6335	6444	6454	6464	6474	6484	6493	6503	6513	6522	1	2	3	4	5	6	7	8	9
45	6532	6542	6551	6561	6571	6580	6590	6599	6609	6618	1	2	3	4	5	6	7	8	9
46	6628	6637	6646	6656	6665	6675	6684	6693	6702	6712	1	2	3	4	5	6	7	7	8
47	6721	6730	6739	6749	6758	6767	6776	6785	6794	6803	1	2	3	4	5	6	6	7	8
48	6812	6821	6830	6839	6848	6857	6866	6875	6884	6893	1	2	3	4	4	6	6	7	8
49	6902	6911	6920	6928	6937	6946	6955	6964	6972	6981	1	2	3	4	4	6	6	7	8
50	6990	6998	7007	7016	7024	7033	7042	7050	7059	7067	1	2	3	3	4	5	6	7	8
51	7076	7084	7093	7101	7110	7118	7126	7135	7143	7152	1	2	3	3	4	5	6	7	8
52	7160	7168	7177	7185	7193	7202	7210	7218	7226	7235	1	2	2	3	4	5	6	7	7
53	7243	7251	7259	7267	7275	7284	7292	7300	7308	7316	1	2	2	3	4	5	6	6	7
54	7324	7332	7340	7348	7356	7364	7372	7380	7388	7396	1	2	2	3	4	5	6	6	7
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Nat. Zahl.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
55	7404	7412	7419	7427	7435	7443	7451	7459	7466	7474	1	2	2	3	4	5	5	6	7
56	7482	7490	7497	7505	7513	7520	7528	7536	7543	7551	1	2	2	3	4	5	5	6	7
57	7559	7566	7574	7582	7589	7597	7604	7612	7619	7627	1	2	2	3	4	5	5	6	7
58	7634	7642	7649	7657	7664	7672	7679	7686	7694	7701	1	1	2	3	4	4	5	6	7
59	7709	7716	7723	7731	7738	7745	7752	7760	7767	7774	1	1	2	3	4	4	5	6	7
60	7782	7789	7796	7803	7810	7818	7825	7832	7839	7846	1	1	2	3	4	4	5	6	6
61	7853	7860	7868	7875	7882	7889	7896	7903	7910	7917	1	1	2	3	4	4	5	6	6
62	7924	7931	7938	7945	7952	7959	7966	7973	7980	7987	1	1	2	3	4	4	5	6	6
63	7993	8000	8007	8014	8021	8028	8035	8041	8048	8055	1	1	2	3	4	4	5	5	6
64	8062	8069	8075	8082	8089	8096	8102	8109	8116	8122	1	1	2	3	4	4	5	5	6
65	8129	8136	8142	8149	8156	8162	8169	8176	8182	8189	1	1	2	3	3	4	5	5	6
66	8195	8202	8209	8215	8222	8228	8235	8241	8248	8254	1	1	2	3	3	4	5	5	6
67	8261	8267	8274	8280	8287	8293	8299	8306	8312	8319	1	1	2	3	3	4	5	5	6
68	8325	8331	8338	8344	8351	8357	8363	8370	8376	8382	1	1	2	3	3	4	4	5	6
69	8388	8395	8401	8407	8414	8420	8426	8432	8439	8445	1	1	2	2	3	4	4	5	6
70	8451	8457	8463	8470	8476	8482	8488	8494	8500	8506	1	1	2	2	3	4	4	5	6
71	8513	8519	8525	8531	8537	8543	8549	8555	8561	8567	1	1	2	2	3	4	4	5	5
72	8573	8579	8585	8591	8597	8603	8609	8615	8621	8627	1	1	2	2	3	4	4	5	5
73	8633	8639	8645	8651	8657	8663	8669	8675	8681	8686	1	1	2	2	3	4	4	5	5
74	8692	8698	8704	8710	8716	8722	8727	8733	8739	8745	1	1	2	2	3	4	4	5	5
75	8751	8756	8762	8768	8774	8779	8785	8791	8797	8802	1	1	2	2	3	3	4	5	5
76	8808	8814	8820	8825	8831	8837	8842	8848	8854	8859	1	1	2	2	3	3	4	5	5
77	8865	8871	8876	8882	8887	8893	8899	8904	8910	8915	1	1	2	2	3	3	4	4	5
78	8921	8927	8932	8938	8943	8949	8954	8960	8965	8971	1	1	2	2	3	3	4	4	5
79	8976	8982	8987	8993	8998	9004	9009	9015	9020	9025	1	1	2	2	3	3	4	4	5
80	9031	9036	9042	9047	9053	9058	9063	9069	9074	9079	1	1	2	2	3	3	4	4	5
81	9085	9090	9096	9101	9106	9112	9117	9122	9128	9133	1	1	2	2	3	3	4	4	5
82	9138	9143	9149	9154	9159	9165	9170	9175	9180	9186	1	1	2	2	3	3	4	4	5
83	9191	9196	9201	9206	9212	9217	9222	9227	9232	9238	1	1	2	2	3	3	4	4	5
84	9243	9248	9253	9258	9263	9269	9274	9279	9284	9289	1	1	2	2	3	3	4	4	5
85	9294	9299	9304	9309	9315	9320	9325	9330	9335	9340	1	1	2	2	3	3	4	4	5
86	9345	9350	9355	9360	9365	9370	9375	9380	9385	9390	1	1	2	2	3	3	4	4	5
87	9395	9400	9405	9410	9415	9420	9425	9430	9435	9440	0	1	1	2	2	3	3	4	4
88	9445	9450	9455	9460	9465	9469	9474	9479	9484	9489	0	1	1	2	2	3	3	4	4
89	9494	9499	9504	9509	9513	9518	9523	9528	9533	9538	0	1	1	2	2	3	3	4	4
90	9542	9547	9552	9557	9562	9566	9571	9576	9581	9586	0	1	1	2	2	3	3	4	4
91	9590	9595	9600	9605	9609	9614	9619	9624	9628	9633	0	1	1	2	2	3	3	4	4
92	9638	9643	9647	9652	9657	9661	9666	9671	9675	9680	0	1	1	2	2	3	3	4	4
93	9685	9689	9694	9699	9703	9708	9713	9717	9722	9727	0	1	1	2	2	3	3	4	4
94	9831	9736	9741	9745	9750	9754	9759	9763	9768	9773	0	1	1	2	2	3	3	4	4
95	9777	9782	9786	9791	9795	9800	9805	9809	9814	9818	0	1	1	2	2	3	3	4	4
96	9823	9827	9832	9836	9841	9845	9850	9854	9859	9863	0	1	1	2	2	3	3	4	4
97	9868	9872	9877	9881	9886	9890	9894	9899	9903	9908	0	1	1	2	2	3	3	4	4
98	9912	9917	9921	9926	9930	9934	9939	9943	9948	9952	0	1	1	2	2	3	3	4	4
99	9956	9961	9965	9969	9974	9978	9983	9987	9991	9996	0	1	1	2	2	3	3	4	4
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Log.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
·00	1000	1002	1005	1007	1009	1012	1014	1016	1019	1021	0	0	1	1	1	1	2	2	2
·01	1023	1026	1028	1030	1033	1035	1038	1040	1042	1045	0	0	1	1	1	1	2	2	2
·02	1047	1050	1052	1054	1057	1059	1062	1064	1067	1069	0	0	1	1	1	1	2	2	2
·03	1072	1074	1076	1079	1081	1084	1086	1089	1091	1094	0	0	1	1	1	1	2	2	2
·04	1096	1099	1102	1104	1107	1109	1112	1114	1117	1119	0	1	1	1	1	2	2	2	2
·05	1122	1125	1127	1130	1132	1135	1138	1140	1143	1146	0	1	1	1	1	2	2	2	2
·06	1148	1151	1153	1156	1159	1161	1164	1167	1169	1172	0	1	1	1	1	2	2	2	2
·07	1175	1178	1180	1183	1186	1189	1191	1194	1197	1199	0	1	1	1	1	2	2	2	2
·08	1202	1205	1208	1211	1213	1216	1219	1222	1225	1227	0	1	1	1	1	2	2	2	3
·09	1230	1233	1236	1239	1242	1245	1247	1250	1253	1256	0	1	1	1	1	2	2	2	3
·10	1259	1262	1265	1268	1271	1274	1276	1279	1282	1285	0	1	1	1	1	2	2	2	3
·11	1288	1291	1294	1297	1300	1303	1306	1309	1312	1315	0	1	1	1	2	2	2	2	3
·12	1318	1321	1324	1327	1330	1334	1337	1340	1343	1346	0	1	1	1	2	2	2	2	3
·13	1349	1352	1355	1358	1361	1365	1368	1371	1374	1377	0	1	1	1	2	2	2	3	3
·14	1380	1384	1387	1390	1393	1396	1400	1403	1406	1409	0	1	1	1	2	2	2	3	3
·15	1413	1416	1419	1422	1426	1429	1432	1435	1439	1442	0	1	1	1	2	2	2	3	3
·16	1445	1449	1452	1455	1459	1462	1466	1469	1472	1476	0	1	1	1	2	2	2	3	3
·17	1479	1483	1486	1489	1493	1496	1500	1503	1507	1510	0	1	1	1	2	2	2	3	3
·18	1514	1517	1521	1524	1528	1531	1535	1538	1542	1545	0	1	1	1	2	2	2	3	3
·19	1549	1552	1556	1560	1563	1567	1570	1574	1578	1581	0	1	1	1	2	2	2	3	3
·20	1585	1589	1592	1596	1600	1603	1607	1611	1614	1618	0	1	1	1	2	2	3	3	3
·21	1622	1626	1629	1633	1637	1641	1644	1648	1652	1656	0	1	1	2	2	2	3	3	3
·22	1660	1663	1667	1671	1675	1679	1683	1687	1690	1694	0	1	1	2	2	2	3	3	3
·23	1698	1702	1706	1710	1714	1718	1722	1726	1730	1734	0	1	1	2	2	2	3	3	4
·24	1738	1742	1746	1750	1754	1758	1762	1766	1770	1774	0	1	1	2	2	2	3	3	4
·25	1778	1782	1786	1791	1795	1799	1803	1807	1811	1816	0	1	1	2	2	2	3	3	4
·26	1820	1824	1828	1832	1837	1841	1845	1849	1854	1858	0	1	1	2	2	3	3	3	4
·27	1862	1866	1871	1875	1879	1884	1888	1892	1897	1901	0	1	1	2	2	3	3	3	4
·28	1905	1910	1914	1919	1923	1928	1932	1936	1941	1945	0	1	1	2	2	3	3	4	4
·29	1950	1954	1959	1963	1968	1972	1977	1982	1986	1991	0	1	1	2	2	3	3	4	4
·30	1995	2000	2004	2009	2014	2018	2023	2028	2032	2037	0	1	1	2	2	3	3	4	4
·31	2042	2046	2051	2056	2061	2065	2070	2075	2080	2084	0	1	1	2	2	3	3	4	4
·32	2089	2094	2099	2104	2109	2113	2118	2123	2128	2133	0	1	1	2	2	3	3	4	4
·33	2138	2143	2148	2153	2158	2163	2168	2173	2178	2183	0	1	1	2	2	3	3	4	4
·34	2188	2193	2198	2203	2208	2213	2218	2223	2228	2234	1	1	2	2	3	3	4	4	5
·35	2239	2244	2249	2254	2259	2265	2270	2275	2280	2286	1	1	2	2	3	3	4	4	5
·36	2291	2296	2301	2307	2312	2317	2323	2328	2333	2339	1	1	2	2	3	3	4	4	5
·37	2344	2350	2355	2360	2366	2371	2377	2382	2388	2393	1	1	2	2	3	3	4	4	5
·38	2399	2404	2410	2415	2421	2427	2432	2438	2443	2449	1	1	2	2	3	3	4	4	5
·39	2455	2460	2466	2472	2477	2483	2489	2495	2500	2506	1	1	2	2	3	3	4	5	5
·40	2512	2518	2523	2529	2535	2541	2547	2553	2559	2564	1	1	2	2	3	4	4	5	5
·41	2570	2576	2582	2588	2594	2600	2606	2612	2618	2624	1	1	2	2	3	4	4	5	5
·42	2630	2636	2642	2649	2655	2661	2667	2673	2679	2685	1	1	2	2	3	4	4	5	6
·43	2692	2698	2704	2710	2716	2723	2729	2735	2742	2748	1	1	2	3	3	4	4	5	6
·44	2754	2761	2767	2773	2780	2786	2793	2799	2805	2812	1	1	2	3	3	4	4	5	6
·45	2818	2825	2831	2838	2844	2851	2858	2864	2871	2877	1	1	2	3	3	4	5	5	6
·46	2884	2891	2897	2904	2911	2917	2924	2931	2938	2944	1	1	2	3	3	4	5	5	6
·47	2951	2958	2965	2972	2979	2985	2992	2999	3006	3013	1	1	2	3	3	4	5	5	6
·48	3020	3027	3034	3041	3048	3055	3062	3069	3076	3083	1	1	2	3	4	4	5	6	6
·49	3090	3097	3105	3112	3119	3126	3133	3141	3148	3155	1	1	2	3	4	4	5	6	6
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Log.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
·50	3162	3170	3177	3184	3192	3199	3206	3214	3221	3228	1	1	2	3	4	4	5	6	7
·51	3236	3243	3251	3258	3266	3273	3281	3289	3296	3304	1	2	2	3	4	5	5	6	7
·52	3311	3319	3327	3334	3342	3350	3357	3365	3373	3381	1	2	2	3	4	5	5	6	7
·53	3388	3396	3404	3412	3420	3428	3436	3443	3451	3459	1	2	2	3	4	5	6	6	7
·54	3467	3475	3483	3491	3499	3508	3516	3524	3532	3540	1	2	2	3	4	5	6	6	7
·55	3548	3556	3565	3573	3581	3589	3597	3606	3614	3622	1	2	2	3	4	5	6	7	7
·56	3631	3639	3648	3656	3664	3673	3681	3690	3698	3707	1	2	3	3	4	5	6	7	8
·57	3715	3724	3733	3741	3750	3758	3767	3776	3784	3793	1	2	3	3	4	5	6	7	8
·58	3802	3811	3819	3828	3837	3846	3855	3864	3873	3882	1	2	3	4	4	5	6	7	8
·59	3890	3899	3908	3917	3926	3936	3945	3954	3963	3972	1	2	3	4	5	5	6	7	8
·60	3981	3990	3999	4009	4018	4027	4036	4046	4055	4064	1	2	3	4	5	6	6	7	8
·61	4074	4083	4093	4102	4111	4121	4130	4140	4150	4159	1	2	3	4	5	6	7	8	9
·62	4169	4178	4188	4198	4207	4217	4227	4236	4246	4256	1	2	3	4	5	6	7	8	9
·63	4266	4276	4285	4295	4305	4315	4325	4335	4345	4355	1	2	3	4	5	6	7	8	9
·64	4365	4375	4385	4395	4406	4416	4426	4436	4446	4457	1	2	3	4	5	6	7	8	9
·65	4467	4477	4487	4498	4508	4519	4529	4539	4550	4560	1	2	3	4	5	6	7	8	9
·66	4571	4581	4592	4603	4613	4624	4634	4645	4656	4667	1	2	3	4	5	6	7	9	10
·67	4677	4688	4699	4710	4721	4732	4742	4753	4764	4775	1	2	3	4	5	7	8	9	10
·68	4786	4797	4808	4819	4831	4842	4853	4864	4875	4887	1	2	3	4	6	7	8	9	10
·69	4898	4909	4920	4932	4943	4955	4966	4977	4989	5000	1	2	3	5	6	7	8	9	10
·70	5012	5023	5035	5047	5058	5070	5082	5093	5105	5117	1	2	4	5	6	7	8	9	11
·71	5129	5140	5152	5164	5176	5188	5200	5212	5224	5236	1	2	4	5	6	7	8	10	11
·72	5248	5260	5272	5284	5297	5309	5321	5333	5346	5358	1	2	4	5	6	7	9	10	11
·73	5370	5383	5395	5408	5420	5433	5445	5458	5470	5483	1	3	4	5	6	8	9	10	11
·74	5495	5508	5521	5534	5546	5559	5572	5585	5598	5610	1	3	4	5	6	8	9	10	12
·75	5623	5636	5649	5662	5675	5689	5702	5715	5728	5741	1	3	4	5	7	8	9	10	12
·76	5754	5768	5781	5794	5808	5821	5834	5848	5861	5875	1	3	4	5	7	8	9	11	12
·77	5888	5902	5916	5929	5943	5957	5970	5984	5998	6012	1	3	4	5	7	8	10	11	12
·78	6026	6039	6053	6067	6081	6095	6109	6124	6138	6152	1	3	4	6	7	8	10	11	13
·79	6166	6180	6194	6209	6223	6237	6152	6266	6281	6295	1	3	4	6	7	9	10	11	13
·80	6310	6324	6339	6353	6368	6383	6397	6412	6427	6442	1	3	4	6	7	9	10	12	13
·81	6457	6471	6486	6501	6516	6531	6546	6561	6577	6592	2	3	5	6	8	9	11	12	14
·82	6607	6622	6637	6653	6668	6683	6699	6714	6730	6745	2	3	5	6	8	9	11	12	14
·83	6761	6776	6792	6808	6823	6839	6855	6871	6887	6902	2	3	5	6	8	9	11	13	14
·84	6918	6934	6950	6966	6982	6998	7015	7031	7047	7063	2	3	5	6	8	10	11	13	15
·85	7079	7096	7112	7129	7145	7161	7178	7194	7211	7228	2	3	5	7	8	10	12	13	15
·86	7244	7261	7278	7295	7311	7328	7345	7362	7379	7396	2	3	5	7	8	10	12	13	15
·87	7413	7430	7447	7464	7482	7499	7516	7534	7551	7568	2	3	5	7	9	10	12	14	16
·88	7586	7603	7621	7638	7656	7674	7691	7709	7727	7745	2	4	5	7	9	11	12	14	16
·89	7762	7780	7798	7816	7834	7852	7870	7889	7907	7925	2	4	5	7	9	11	13	14	16
·90	7943	7962	7980	7998	8017	8035	8054	8072	8091	8110	2	4	6	7	9	11	13	15	17
·91	8128	8147	8166	8185	8204	8222	8241	8260	8279	8299	2	4	6	8	9	11	13	15	17
·92	8318	8337	8356	8375	8395	8414	8433	8453	8472	8492	2	4	6	8	10	12	14	15	17
·93	8511	8531	8551	8570	8590	8610	8630	8650	8670	8690	2	4	6	8	10	12	14	16	18
·94	8710	8730	8750	8770	8790	8810	8831	8851	8872	8892	2	4	6	8	10	12	14	16	18
·95	8913	8933	8954	8974	8995	9016	9036	9057	9078	9099	2	4	6	8	10	12	15	17	19
·96	9120	9141	9162	9183	9204	9226	9247	9268	9290	9311	2	4	6	8	11	13	15	17	19
·97	9333	9354	9376	9397	9419	9441	9462	9484	9506	9528	2	4	7	9	11	13	15	17	20
·98	9550	9572	9594	9616	9638	9661	9683	9705	9727	9750	2	4	7	9	11	13	16	18	20
·99	9772	9795	9817	9840	9863	9886	9908	9931	9954	9977	2	5	7	9	11	14	16	18	20
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Mathematische Formeln.

Im Folgenden sind eine Reihe von häufig benutzten mathematischen Formeln zusammengestellt.

Proportionen.

Ist
$$a : b = c : d,$$
so folgt:

$ad = cb$, $a = bc/d$, $a : a + b = c : c + d$, $a : a - b = c : c - d$ u. s. f.

Inhalt eines Dreieckes. Ist g die Grundlinie, h die Höhe, so ist:

$$\text{Inhalt } J \text{ (Dreieck)} = \frac{1}{2}\, g h.$$

Inhalt eines Rechteckes. Sind a und b die Seiten, so ist:

$$J \text{ (Rechteck)} = a \,.\, b.$$

Beim Quadrat ist $a = b$ also:

$$J \text{ (Quadrat)} = a^2.$$

Umfang eines Kreises. Der Umfang eines Kreises, dessen Radius die Länge 1 hat, ist gleich π · Längeneinheiten, wo

$$\pi = 3{,}14159 \ldots . = \frac{22}{7} \text{ (abgerundet)},$$

π heisst die Ludolf'sche Zahl.

Der Umfang U eines Kreises vom Radius r ist:

$$U \text{ (Kreis)} = 2 \pi r.$$

Inhalt eines Kreises. Ist r der Radius, so ist:

$$J \text{ (Kreis)} = \pi r^2.$$

Inhalt eines Prismas. Ist G die Grundfläche, H die Höhe, so ist:

$$J \text{ (Prisma)} = G H.$$

Inhalt eines rechtwinkligen Parallelepipedes. Sind die drei Kanten $a\, b\, c$, so ist:

$$J \text{ (Parallelepiped)} = a \,.\, b \,.\, c.$$

Für den Würfel ist $a = b = c$, also:

$$J \text{ (Würfel)} = a^3.$$

Inhalt eines Kreiscylinders. Ist der Radius des Kreises r, die Höhe H, so wird in der Gleichung für das Prisma $G = \pi r^2$, also:

$$J \text{ (Kreiscylinder)} = \pi r^2 H.$$

Inhalt einer Pyramide. Ist G die Grundfläche, H die Höhe, so ist:

$$J \text{ (Pyramide)} = \frac{1}{3} G H.$$

Inhalt eines Kreiskegels mit dem Radius r; hier ist $G = \pi r^2$, also:

$$J \text{ (Kreiskegel)} = \frac{1}{3} \pi r^2 H.$$

Oberfläche einer Kugel. Ist r der Radius, so ist:

$$O \text{ (Kugel)} = 4 \pi r^2.$$

Die Oberfläche der Kugel vom Radius 1 ist also:

$$4 \pi.$$

Die Oberflächen von Kugeln wachsen wie die Quadrate der Radien. Hat also eine Kugel B den doppelten, dreifachen, $n$fachen Radius wie eine andere A, so hat B die 4fache, 9fache, n^2fache Oberfläche wie A. Sind die Kugeln A und B um denselben Mittelpunkt beschrieben und geht von diesem eine bestimmte Energiemenge aus, so trifft auf die Oberflächeneinheiten der Kugeln B $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{9}$ .... $\frac{1}{n^2}$ so viel Energie, als auf die Oberflächeneinheit der Kugel A.

Inhalt einer Kugel. Ist r der Radius, so ist:

$$J \text{ (Kugel)} = \frac{4}{3} \pi r^3.$$

Darstellung von Zahlen durch Potenzen von 10.

Vielzifferige Zahlen, von denen nur die ersten Ziffern sich genau feststellen lassen und Decimalbrüche mit vielen Nullen nach dem Komma lassen sich unter Benutzung der Potenzen von 10 sehr bequem schreiben; zugleich wird dadurch die Rechnung wesentlich erleichtert. Es ist:

$$10^0 = 1,\ 10^1 = 10,\ 10^2 = 100 \ldots 10^6 = 1 \text{ Million},\ 10^{12} = 1 \text{ Billion},$$

$$10^{-1} = {}^1/_{10} = 0{,}1,\ 10^{-2} = 0{,}01,\ 10^{-6} = 1 \text{ Millionstel} = 0{,}000001 \text{ u. s. f.}$$

Eine Vereinfachung der Rechnungen beruht hierbei darauf, dass man, um Potenzen derselben Basis zu multipliciren, ihre Exponenten addirt; so ist:

$$100 \,.\, 1\,000\,000 = 10^2 \,.\, 10^6 = 10^8,$$

$$100 \cdot \frac{1}{1\,000\,000} = 10^2 \,.\, 10^{-6} = 10^{-4} = \frac{1}{10\,000}.$$

Beispiel. 1) Um die Lichtgeschwindigkeit $v = 300\,000$ km/sec. in cm/sec. zu erhalten, beachtet man, dass 1 km = 1000 m, 1 m = 100 cm ist, und hat also:

$$v = 3 \,.\, 10^5 \text{ km/sec.} = 3 \,.\, 10^5 \,.\, 10^3 \,.\, 10^2 \text{ cm/sec.} = 3 \,.\, 10^{10} \text{ cm/sec.}$$

2) Es soll aus Messungen der Wellenlänge λ (für das Orange) und der Lichtgeschwindigkeit v die Zahl n der Lichtschwingungen in der Secunde bestimmt werden. Die Zahl n ist der reciproke Werth $1/\tau$ der Dauer τ einer Lichtschwingung. Während der Dauer τ einer Schwingung schreitet das Licht um die Wellenlänge λ fort. Dazu ist eine Zeit $\tau = \frac{\lambda}{v}$ nöthig.

Für das Orange ist:

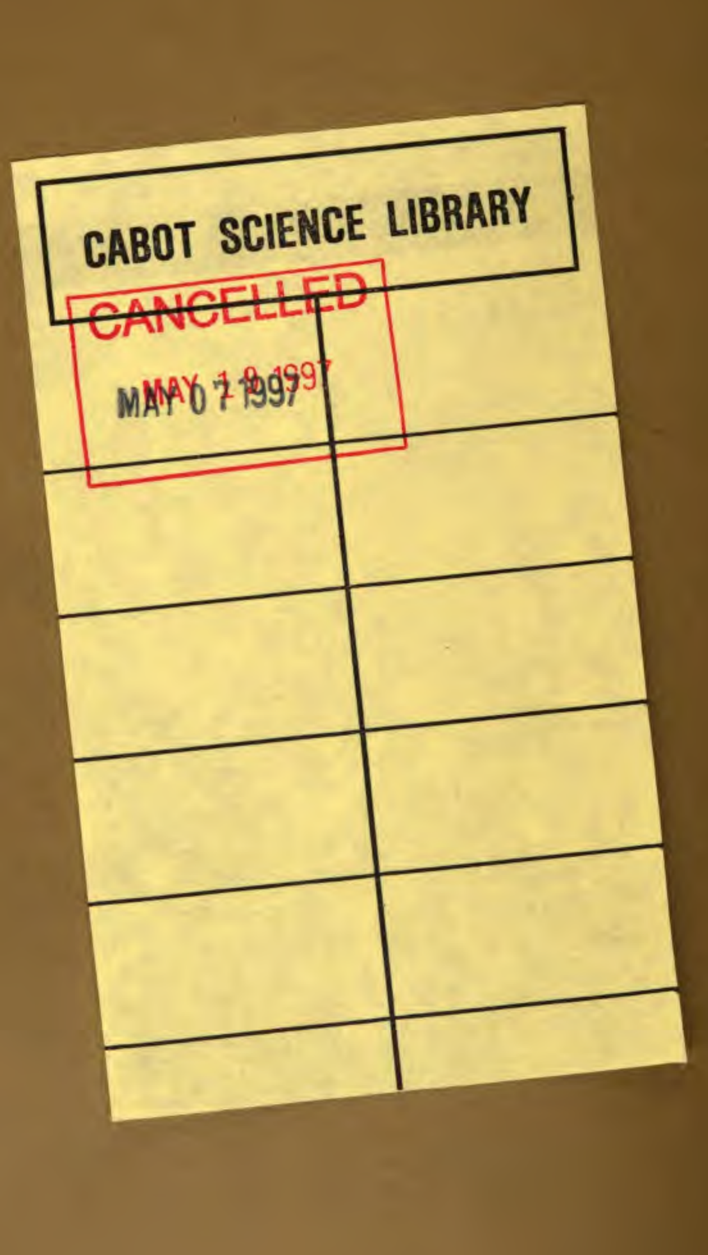
$$\lambda = 0{,}0006\,\text{mm} = 6 \,.\, 10^{-4}\,\text{mm} = 6 \,.\, 10^{-5}\,\text{cm}.$$

Ferner ist $v = 3 \,.\, 10^{10}\,\text{cm/sec}$,

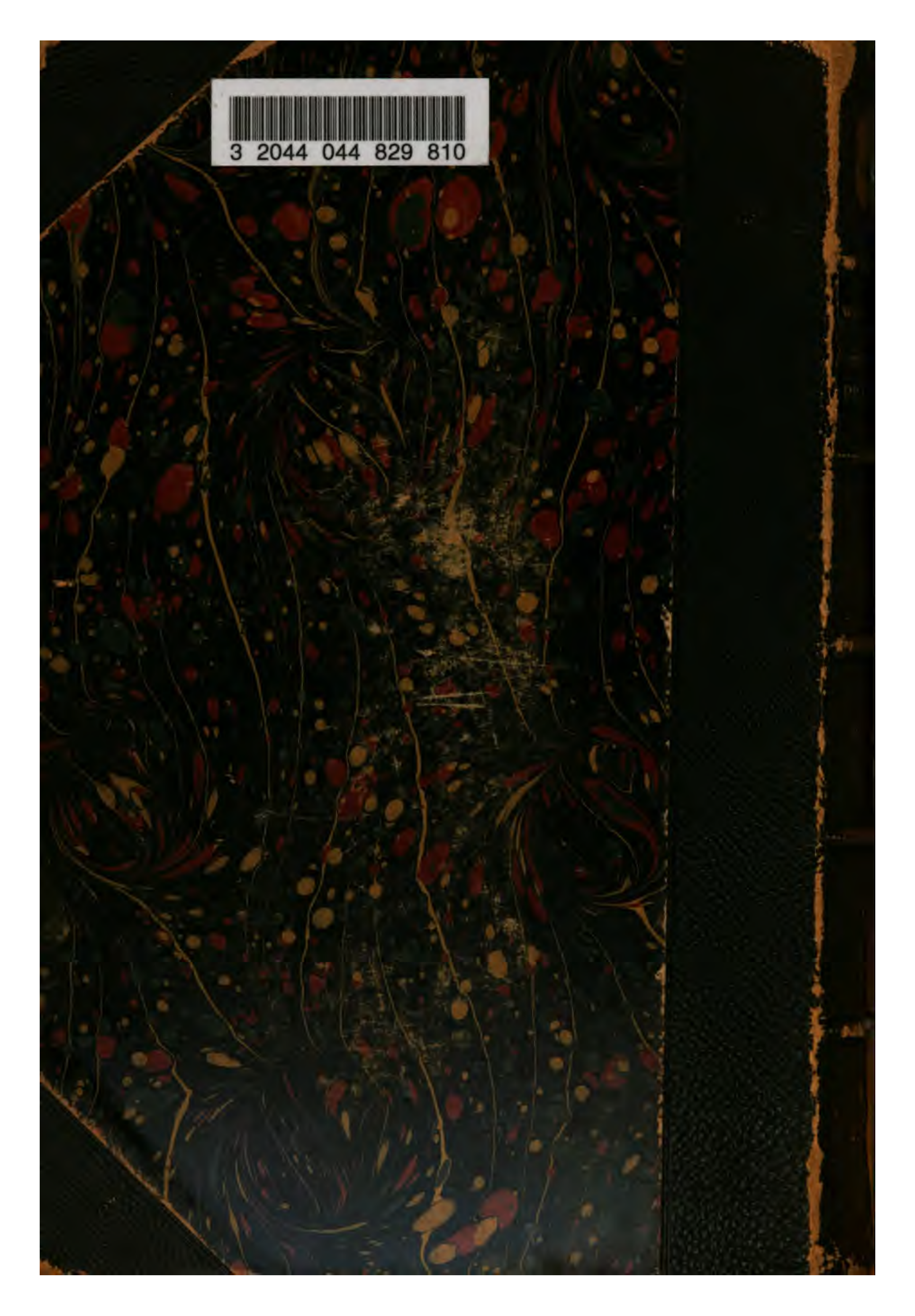
$$\text{also ist } \tau = \frac{\lambda}{v} = \frac{6 \,.\, 10^{-5}}{3 \,.\, 10^{10}} \text{ und}$$

$$n = \frac{1}{\tau} = \frac{3 \,.\, 10^{10}}{6 \,.\, 10^{-5}} = \frac{30 \,.\, 10^{9}}{6 \,.\, 10^{-5}} = 5 \,.\, 10^{+14} = 500 \,.\, 10^{12},$$

d. h. in dem orangenen Licht werden 500 Billionen Schwingungen in der Secunde ausgeführt.


CABOT SCIENCE LIBRARY
CANCELLED
MAY 1 9 1997
MAY 0 7 1997


3 2044 044 829 810


3 2044 044 829 810